University of Natural Resources and Life Sciences Vienna
Department of Forest and Soil Sciences

Forschungsauftrag

Evaluierung verschiedener ÖPUL Maßnahmen in Hinblick auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen, insbesondere Lachgas

Endbericht

Cecilie B. Foldal, Martina Kasper, Eva Ecker und
Sophie Zechmeister-Boltenstern

Mit Unterstützung von Bund, Ländern und Europäischer Union

Bundesministerium Nachhaltigkeit und Tourismus

LE 14-20
Entwicklung für den Ländlichen Raum

Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums: Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete.

Wien, 2019-10-15

Impressum

Auftraggeber:

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT)

Abteilung II/1

Stubenring 1

1010 Wien

Forschungsauftrag: Evaluierung verschiedener ÖPUL Maßnahmen in Hinblick auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen, insbesondere Lachgas

Projektleitung: Sophie Zechmeister-Boltenstern

Autorinnen: Cecilie B. Foldal, Martina Kasper, Eva Ecker, Sophie Zechmeister-Boltenstern

Laufzeit: 14 Monate, Juni 2018 – September 2019

Berichtsdatum: 15.10.2019

Ausführung: pdf

Auftragnehmer/Herausgeber:

Universität für Bodenkultur (BOKU)

Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Institut für Bodenforschung

Peter Jordan Str. 82

1190 Wien

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS 3

1 EINLEITUNG 11

1.1 Hintergrund 11

1.2 ÖPUL - rechtliche Rahmenbedingungen 12

1.2.1 Beschreibung der für diese Studie aktuellen ÖPUL-Maßnahmen 13

1.3 Vorhaben 17

2 MATERIAL UND METHODEN 17

2.1 Untersuchungsgebiet – Geographie 17

2.1.1 Lage 17

2.1.2 Böden 19

2.1.3 Klima 21

2.1.4 Flächenverteilung 23

2.2 Nutzung Acker 25

2.2.1 Fruchtfolge 25

2.2.2 Ertrag 27

2.2.3 Düngung 28

2.3 Nutzung Grünland 30

2.3.1 Bewirtschaftungsintensität, Flächen und Ertrag 30

2.3.2 Düngung 30

2.4 Modellierung 31

2.5 Auswertung 33

2.5.1 Statistik 34

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION 35

3.1 Ackerböden 35

3.1.1 N_2O Emissionen 35

REGION 39

3.1.2 Erträge 43

3.1.3 Stickstoffflüsse, Nutzungseffizienz und N-Überschuss 46

3.2 Grünlandböden 52

3.2.1 N_2O Emissionen 52

3.2.2 Erträge 56

3.2.3 Stickstoffflüsse und N-Überschuss 57

4 FAZIT UND AUSBLICK 61

QUELLENVERZEICHNIS: 64

4.1 Literatur **64**

4.2 Verordnungen und Leitlinien **67**

ANHANG **67**

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodenparameter der ausgewählten Bodentypen 20

Tabelle 2: Durchschnittliche, jährliche Klimadaten der ZAMG Wetterstationen (2005 – 2014) 22

Tabelle 3: Anteil der Feldfrüchte zur Erstellung der Fruchtfolgen in den drei Ackerbauregionen Marchfeld, Grieskirchen und Oststeirisches Hügelland 25

Tabelle 4: Mittlere regionale Erträge mit Standardabweichung (StAw) der Jahre 2005 bis 2014 und prozentueller Anteil erwarteter, biologischer Erträge der simulierten Kulturen. N= Anzahl der regionalen Ertragsdaten pro Jahr. 28

Tabelle 5: Übersicht der durchschnittlichen Düngemengen (kg N ha^{-1} yr^{-1}) in den verschiedenen Bewirtschaftungsvarianten je Region und Landnutzung. 29

Tabelle 6: Übersicht der Düngemengen in den modellierten Regionen je Ackerkultur und Bewirtschaftungsvariante 29

Tabelle 7: Mittlere Erträge (dt TM ha^{-1}) von den intensiv bewirtschafteten Grünlandflächen in den Jahren 2005 – 2014. StAww = Standardabweichung, N = Anzahl Messwerte 30

Tabelle 8: Durchschnittliche Düngemengen der intensiv bewirtschafteten Grünlandflächen basierend auf NAPV und Tierhaltungesdaten - je nach Region und Bewirtschaftungsvariante 31

Tabelle 9: Übersicht der simulierten Bewirtschaftungsvarianten der Regionen 32

Tabelle 10: Pflanzenphysiologische Parameter von Ackerkulturen und Grünland, die bei der Regionalisierung des Modells angepasst wurden 33

Tabelle 11: Simulierte mittlere, niedrigste (Minimum) und höchste (Maximum) jährliche N_2O Emissionen (kg N_2O-N ha^{-1}) aller Bewirtschaftungsvarianten in den drei Regionen Grieskirchen (GK), Marchfeld (MF) und Oststeirisches Hügelland (OH) aus den Jahren 2005 – 2014. 36

Tabelle 12: Korrelationen zwischen kg N_2O-N ha^{-1} yr^{-1} und verschiedene Standort- und Bewirtschaftungs-parameter in den drei Regionen mit deren Signifikanzen (n.s. = nicht signifikant, * = $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** = $p<0.001$) 39

Tabelle 13: Modellierte mittlere Erträge der verschiedenen Ackerkulturen ja nach Bewirtschaftung 44

Tabelle 14: Modellierte, gewichtete Mittelwerte der N-Flüsse und des N-Budgets in kg N ha^{-1} yr^{-1} aller Bewirtschaftungsvarianten in den drei Ackerregionen Grieskirchen (GK), Marchfeld (MF) und Oststeirisches Hügelland (OH). 48

Tabelle 15: Durchschnitt der N-Nutzungseffizienz (NUE), ertragsbasiertem N_2O (kg N_2O-N TM^{-1}) und N-Überschuss als Differenz des N-Inputs und N-Ertrags aller Kulturen in allen Bewirtschaftungssystemen in allen Regionen für die Jahre 2005 – 2014. 50

Tabelle 16: Mittlere, niedrigste (Minimum) und höchste (Maximum) jährliche N_2O Emissionen nach Bewirtschaftung in den vier Regionen Ennstal (ET), Flachgau (FL), Grieskirchen (GK) und Oststeirisches Hügelland (OH) 52

Tabelle 17: Korrelationen zwischen den jährlichen N_2O Emissionen der intensiv bewirtschafteten Grünlandböden in den vier Regionen Ennstal (ET), Flachgau (FL), Grieskirchen (GK) und Oststeirisches Hügelland (OH) und einige Standort- und Bewirtschaftungsparameter 54

Tabelle 18: Übersicht der modellierten, mittleren Erträge in dt Trockenmasse (TM) pro Hektar und Jahr 57

Tabelle 19: Gewichtete N-Budgets der drei Bewirtschaftungsvarianten von intensiv bewirtschafteten Grünlandflächen in den Regionen Ennstal (ET), Flachgau (FL), Grieskirchen (GK), und Oststeirisches Hügelland (OH) 59

Tabelle 20: Durchschnitt der N-Nutzungseffizienz (NUE), ertragsbasiertem N_2O (kg N_2O-N TM^{-1}) und N-Überschuss als Differenz zwischen N-Input und N-Ertrag des intensiven Grünlands in allen Bewirtschaftungssystemen und Regionen im Zeitraum 2005 – 2014. 60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Landwirtschaftliche Haupt- und Kleinproduktionsgebiete Österreichs, Gebietsstand 2019 mit den ausgewählten Regionen ET = Ennstal, FL = Flachgau, GK = Grieskirchen Kremsmünster Gebiet, MF = Marchfeld und OH = Oststeirisches Hügelland. 18

Abbildung 2: Lage der modellierten Regionen in den Trocken- und Feuchtgebieten Österreichs (aus Resl & Brückl 2016) 21

Abbildung 3: Mittlere Jahrestemperatur (Linien) und Niederschlagssumme (Balken) in den Jahren 2005 – 2014 aller Wetterstationen der Regionen. ETa= Ennstal, Aigen; ETi=Ennstal, Irdning; FL=Flachgau; GK=Grieskirchen; OH=Ostesteirisches Hügelland; MFg=Marchfeld Gänserndorf; MFgr=Marchfeld, Großenzersdorf 22

Abbildung 4: Durchschnittlicher Anteil der vorherrschenden Kulturen von den gesamten landwirtschaftlichen Nutzflächen (2005 – 2017) in den gewählten Regionen. 24

Abbildung 5: N_2O Emissionen der modellierten Ackerbauregionen bei unterschiedlicher Bewirtschaftung (konv_MAX = konventionelle Bewirtschaftung mit maximal erlaubten Mineraldüngemengen; konv -25% = konventionelle Bewirtschaftung mit um 25% reduziertem Mineraldüngereinsatz; konv -15% = konventionelle Bewirtschaftung mit 15% reduziertem Mineraldüngereinsatz; konv_UBB = konventionelle Bewirtschaftung nach UBB Bestimmung; biologisch = biologische Bewirtschaftung). Kleine Buchstaben = signifikante Unterschiede ($p<0.05$) zwischen den Bewirtschaftungsvarianten in einer Region. . = Mittelwert; Punkte = Ausreißer. 37

Abbildung 6: Jährliche N_2O Emissionen nach Bodenart (LOSA = lehmiger Sand; LOSI = lehmiger Schluff, SALO = sandiger Lehm, SASI = sandiger Schluff, SILT = Schluffboden) in den drei Regionen Grieskirchen (GK), Marchfeld (MF) und Oststeirisches Hügelland (OH) für die Simulationsperiode 2005 – 2014. 40

Abbildung 7: Jährliche N_2O Emissionen (kg N_2O-N ha^{-1}) der einzelne Ackerkulturen in den drei Regionen Grieskirchen (GK), Marchfeld (MF) und Oststeirisches Hügelland (OH) 42

Abbildung 8: Unterschied der N_2O Emissionen aller Reduktionsmaßnahmen (konv_-15%; konv_-25%; konv_UBB; biologisch) im Vergleich zum höchstzulässigen Düngungsniveau (konv_MAX). BARL = Sommergetreide, BEET = Zuckerrübe, CORN = Mais, CURB = Ölkürbis, ONIO = Gemüse, RAPE = Winterraps, SOYB = Sojabohne, WBAR und WWIS = Wintergetreide 43

Abbildung 9: Unterschiede in % von mittleren jährlichen N_2O Emissionen und Ertrag zwischen den Bewirtschaftungsmaßnahmen konv_-15%, konv_-25%, konv_UBB und biologisch im Vergleich zu konv_MAX. 45

Abbildung 10: Vergleich der N_2O Emissionen und Ertrag der Kulturen bei konv_-15%, konv_-25%, konv_UBB und biologischer Bewirtschaftung aller Regionen, Jahre und Böden in % von den konv_MAX Ergebnissen (es wurden nur Kulturen, die bei konv_MAX angebaut werden, berücksichtigt). BARL = Sommergetreide, BEET = Zuckerrübe, CORN = Mais, CURB = Ölkürbis, ONIO = Gemüse, RAPE = Winterraps, SOYB = Sojabohne, WBAR und WWIS = Wintergetreide 46

Abbildung 11: N-Budget (kg N ha^{-1} yr^{-1}) aller Bewirtschaftungsvarianten bei den Ackerkulturen als Mittelwerte der 10 Jahren (2005 – 2014) in allen Regionen. .... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Abbildung 12**:** N_2O Emissionen der modellierten Grünlandböden in Ennstal (ET), Flachgau (FL), Grieskirchen (GK) und Oststeirisches Hügelland (OH) bei unterschiedlicher Bewirtschaftung (konv_UBB =

konventionelle Bewirtschaftung nach UBB Bestimmung; konv_MAX = konventionelle Bewirtschaftung mit maximal erlaubter Mineraldüngemengen; biologisch = biologische Bewirtschaftung). Kleine Buchstaben zeigen die Signifikanzen zwischen den Bewirtschaftungsvarianten in der Region, große Buchstaben zeigen die regionalen Unterschiede innerhalb der Bewirtschaftungsvarianten, alle Signifikanzen $p<0.05$. = Mittelwert; Punkte = Ausreißer. 53

Abbildung 13: jährliche N_2O Emissionen bei konv_MAX und biologischer Grünlandbewirtschaftung in den vier Regionen aufgeschlüsselt nach Jahren 55

Abbildung 14: Jährliche N_2O Emissionen von konv_MAX, konv_UBB und biologischer Bewirtschaftung aller vier Regionen nach Bodenart. Punkte beschreiben Ausreißer, kleine Buchstaben zeigen die Signifikanzen innerhalb der Bewirtschaftungsvarianten der Regionen. 56

Abbildung 15: % Unterschied zwischen N_2O Emissionen und Erträgen von konv_UBB und biologischer Bewirtschaftung, sowie der konv_MAX (=0). Jährliche Mittelwerte aller Grünlandböden in den vier Regionen. 57

Abbildung 16: N-Budget (kg N ha^{-1} yr^{-1}) aller Bewirtschaftungsvarianten im Grünland als Mittelwerte der 10 Jahren (2005 – 2014) in allen Regionen. 59

Abkürzungsverzeichnis:

AP = Aktionsprogramm

BARL = Sommergetreide

BAW = Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen

BBK = Bezirksbauernkammer

BEET = Zuckerrübe

C = Kohlenstoff (hier ausschließlich für Bodenkohlenstoff verwendet)

CC = Cross Compliance

CO_2 = Kohlendioxid

Corg = organischer Bodenkohlenstoff

CORN = Mais

CURB = Ölkürbis

eBOD = digitale Bodenkarte

EEA = Europäische Umweltagentur

ET = Ennstal und Seitentäler

FK= Feldkapazität

FL = Flachgau

GAP = Gemeinsame Agrarpolitik

GLOB = Globalstrahlung in W m^{-2}

GLÖZ = gutem landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand

GK = Grieskirchen Kremsmünster Gebiet

Hc = Wasserleitfähigkeit

INVEKOS = Integriertes Verwaltung- und Kontrollsystem

konv_MAX = konventionelle Bewirtschaftung mit maximal erlaubten Mineraldüngemengen

konv_UBB = konventionelle Bewirtschaftung nach UBB Bestimmung

konv_-15% = konventionelle Bewirtschaftung mit einem um 15% reduzierten Mineraldüngereinsatz

konv_-25% = konventionelle Bewirtschaftung mit einem um 25% reduzierten Mineraldüngereinsatz

KPG = Kleinproduktionsgebiet

L = Landnutzung

LD =Lagerungsdichte

LE = Ländliche Entwicklung

LK = Landwirtschaftskammer

LOSA = lehmiger Sand

LOSI = lehmiger Schluff

MF = Marchfeld FF

MJNS = Mittlerer Jahresniederschlag in mm

MJT = mittlere Jahrestemperatur in °C

N = Stickstoff

N_2 = Distickstoff

N_2O = Lachgas

NAPV = Nitrat-Aktionsprogramm-Verordnung

NH_3^- = Ammoniak

NH_4^+ = Ammonium

NO = Stickstoffmonoxid

NO_3^- = Nitrat

N_{org} = organischer Stickstoff

n.s = nicht signifikant

NUE = Nutzungseffizienz

ONIO = Gemüse

ÖPUL = Österreichisches Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft

OH = Oststeirisches Hügelland

RAPE = Winterraps

RF = relative Feuchtigkeit in %

SALO = sandiger Lehm

SASI = sandiger Schluff

SILT = Schluffboden

SILO = schluffiger Lehm

Skel = Skelettanteil > 2 mm

SOYB = Sojabohne

StAw = Standardabweichung

THG = Treibhausgas

TM = Trockenmasse

T_{max} = gemittelte Maximaltemperatur in °C

T_{min} = gemittelte Minimaltemperatur in °C

UBB = Umweltgerechte und biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung

WBAR und WWIS = Wintergetreide

Wind = Windgeschwindigkeit in m s^{-1}

WP= Welkepunkt

ZAMG = Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

ZF = Zwischenfrucht

Zusammenfassung

In diesem Projekt wurde der Einfluss verschiedener Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Stickstoffflüsse und –pools landwirtschaftlich genutzter Böden mit Hilfe des prozessorientierten Ökosystemmodells LandscapeDNDC modelliert und bewertet. Dazu wurden Acker- und Grünlandflächen in fünf repräsentativen österreichischen Kleinproduktionsgebieten über einen Zeitraum von 10 Jahren untersucht. Der Fokus liegt auf der Evaluierung verschiedener ÖPUL Maßnahmen in Hinblick auf die Reduktion von Treibhausgas (THG) Emissionen, insbesondere Lachgas, verursacht durch die Ausbringung von Stickstoff zur Düngung.

Im Gegensatz zur bisherigen Praxis, die THG Emissionen mit dem Emissionsfaktor zu berechnen, dem die Verkaufszahlen der Mineraldüngermengen zu Grunde liegen, kommt in dieser Studie das Modellierungsprogramm LandscapeDNDC zum Einsatz. LandscapeDNDC ist in der Lage, regionale Bewirtschaftung und lokale Standortseigenschaften zu berücksichtigen. Diese, wie z.B. Klima, Bodeneigenschaften und Pflanzenwachstum haben einen großen Einfluss auf den Stickstoffkreislauf. Das Programm kann alle wichtigen physikalisch-chemischen und biologischen Prozesse im Ökosystem am Standort mathematisch abbilden und die Ergebnisse auf regionale Ebene hochrechnen. Dadurch ermöglicht es regionale N-Inventuren in Bezug auf N-Verluste landwirtschaftlich genutzter Böden zu berechnen.

Für den Ackerbau wurden in drei Kleinproduktionsgebieten (KPG) für drei Bewirtschaftungsformen (konv_MAX, konv_UBB, biologisch) umfangreiche Fruchtfolgen (FF) auf Basis von INVEKOS-Daten und Expertenwissen zusammengestellt. Diese wurden für die Jahre 2005 bis 2014 modelliert.

Die Bewirtschaftungsmaßnahmen umfassen eine Reduktion der Höchstdüngergaben nach der Nitrataktionsprogramm-Verordnung (AP-Nitrat) für die Ackerkulturen. Weiters beinhalten sie biodiversitätsfördernde Maßnahmen sowie die Bewirtschaftung unter den Bedingungen des biologischen Landbaus für Acker und Grünland. Im Ackerbau wurde in Absprache mit dem Auftragsgeber die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern bei konventionellem Anbau nicht berücksichtigt. Stattdessen wurden die Stickstoffmengen, die Teils über den hofeigenen Wirtschaftsdünger ausgebracht werden, als feldfallende N-Mengen (Stickstoffzufuhr) in die Berechnungen miteinbezogen. Diese Methode erlaubt den direkten Vergleich von den Ergebnissen der Düngerreduktionsmaßnahmen in allen Regionen und ermöglicht auch den Vergleich der Standorteigenschaften zwischen viehlosen und viehreichen Regionen. Nachteilig ist jedoch, dass v.a. bei den Winterungen die Auswirkungen einer Herbstdüngung mit Wirtschaftsdünger ausgeschlossen werden.

Basierend auf statistischen Daten der letzten 15 Jahre wurden die Hauptkulturen erhoben und daraus regionstypische FF für konventionelle und biologische Bewirtschaftungssysteme erstellt. Somit können je nach KPG zwischen 33 und 82% der landwirtschaftlichen Nutzfläche erfasst und die N-Emissionen, insbesondere Lachgas modelliert werden.

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Art der Bewirtschaftung, hier im speziellen dem Düngeniveau, und dem Verlust von Lachgas. Die ÖPUL Maßnahme „Umweltgerechte und biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung“ (UBB) zeigt bei gleich hohen N-Düngemengen generell nur etwas geringere Lachgasemissionen als die „intensive konventionelle Bewirtschaftung“. Beim Ackerland der Regionen Marchfeld (MF) und im Gebiet Grieskirchen Kremsmünster (GK) wirkt sich eine verringerte Düngeintensität von -15% enorm auf die Menge der N_2O Emissionen aus. Eine Reduktion von -25% bewirkt, wie erwartet, eine weitere Verringerung der Emissionen, allerdings nicht mehr in einem so hohen Ausmaß. Die biologische Wirtschaftsweise, die generell ein niedrigeres Düngeniveau erreicht, führt sowohl bei der Acker- als auch bei der Grünlandbewirtschaftung zu wesentlich geringeren N_2O Emissionen als konventionelle Bewirtschaftung.

In Zahlen bedeutet das folgendes: Ein Umstieg von intensiv konventioneller Bewirtschaftung (konv_MAX) auf eine Bewirtschaftung mit Biodiversitätsflächen (konv_UBB) erwirkt laut unserer N-Budgetberechnung (in kg N ha yr^{-1}) einen Rückgang der Emissionen um 1 bis 4 kg N ha yr^{-1}. Wird statt konv_MAX die Variante konv_-15% gewählt, so sind Stickstoffemissionseinsparungen zwischen 2 und 8 kg N ha yr^{-1}. Der Umstieg von konv_-15% auf konv_-25% bringt eine weitere Reduktion von 2 bis 4 kg N ha yr^{-1}. Die mit Abstand größten Einsparungen an N-Emissionen werden durch die biologische Bewirtschaftung erzielt. Hier werden beim Umstieg von konv_-25% auf biologisch zwischen 5 und 12 kg N ha yr^{-1} weniger Emissionen freigesetzt. Im Grünland bewirkt ein Umstieg von konv_MAX auf konv_UBB eine Minderung der Emissionen um maximal 1 kg N ha^{-1} yr^{-1}. Wird von konv_UBB auf biologisch gewechselt, so sind Einsparungen von 6 bis 13 kg N ha^{-1} yr^{-1} möglich.

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass bei einer Reduktion bzw. bei niedriger N-Düngung nicht nur N Verluste in die Umwelt verringert, sondern auch ausreichende Erntemengen erzielt werden können. Über die Modellaufzeit von 10 Jahren erreichten alle Bewirtschaftungssysteme im Durchschnitt ein ausgeglichenes bis positives N Budget im Ausmaß von 0 bis 15 kg N ha^{-1} yr^{-1} im Ackerland und 5 bis 17 kg N ha^{-1} yr^{-1} im Grünland. Interessanter Weise untermauern die vorliegenden Ergebnisse auch die Resultate anderer Langzeitstudien über die Zunahme von organischer Bodensubstanz in landwirtschaftlich genutzten Böden in Österreich.

1 EINLEITUNG

1.1 Hintergrund

Lachgas (N_2O) ist ein langlebiges Treibhausgas. In der Stratosphäre ist es für den Ozonabbau verantwortlich (Ravishankara *et al.* 2009). Seit der Vorindustriellen Zeit ist die Konzentration von N_2O in der Atmosphäre um 20% gestiegen, wobei mehr als zwei Drittel dieser Zunahme nach 1945 stattgefunden hat (EEA 2019). N_2O hat mit knapp 120 Jahren eine sehr lange atmosphärische Verweildauer und das 265–fache Erwärmungspotential von Kohlendioxid (IPCC 2013).

In Österreich sind landwirtschaftliche Böden mit 71 % die Hauptquelle der jährlichen N_2O Emissionen (Umweltbundesamt 2019). In den Böden entsteht N_2O beim Abbau und Umbau von stickstoffhaltigen Verbindungen durch mikrobielle Prozesse. Diese biologischen Prozesse werden von Temperatur, Bodenwasser sowie von der Verfügbarkeit von Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen bestimmt. Ebenso spielen der Standort (Klima, Bodenart) und die Bewirtschaftung eine tragende Rolle (Kaiser *et al*. 1998, Schindlbacher *et al*. 2004, Fuss *et al.* 2011 und Shcherbak *et al*. 2014).

Internationale Studien haben gezeigt, dass vor allem die N Düngemenge einen entscheidenden Einfluss auf die N_2O Emissionen hat und dass hohe Düngemengen die N-Verluste stärker als die Erträge beeinflussen (Fuß *et al*. 2011, Kim *et al.* 2015). Van Groeningen *et al.* (2010) zeigen wie wichtig es ist, die N-Düngung nutzungseffizient (NUE) - optimiert zu gestalten. Es sollte möglichst viel des ausgebrachten Düngers in der oberirdischen Pflanzenmasse gebunden werden und nicht als Überschuss („*surplus*“) potentiell emittiert oder ausgewaschen werden.

Flächenbezogene Stickstoffbilanzen eignen sich gut um unterschiedliche Bewirtschaftungssysteme zu vergleichen (Jones *et al*. 2017). In diesen Bilanzen werden die Mengen an ausgebrachtem, fixiertem Stickstoff (inklusive atmosphärischer Deposition) jenen der abgeernteten Biomasse gegenübergestellt. Ein eventueller N-Überschuss wird entweder im Boden biologisch gebunden oder geht an die Umwelt verloren. Betrachtet man das gesamte Staatsgebiet, so beträgt der durchschnittliche Überschuss in Österreich 46 kg N ha^{-1} yr^{-1} brutto und 22 kg N ha^{-1} yr^{-1} netto (Umweltbundesamt 2019). Im Vergleich dazu liegen die brutto N-Überschüsse andere Europäische Länder zwischen 7 und 187 kg N ha^{-1} yr^{-1} (EEA 2018).

Die N-Flüsse in den Agroökosystemen sind, im Gegensatz zu natürlichen Ökosystemen, geprägt durch Ernteverluste und anschließender Zufuhr von organischem oder mineralischem N-Dünger. Diese beiden Größen dominieren die flächenbezogenen Bilanzen. Lachgas macht mengenmäßig einen kleinen Teil des N-Budgets aus, ist aber aufgrund seiner Eigenschaft als Treibhausgas von großer Bedeutung (Ammann *et al*. 2009).

Im Gegensatz zur bisherigen Praxis bei der THG Emissionen mit dem Emissionsfaktor 0.01 kg N_2O-N pro kg mineralischem und organischem N-Dünger sowie auch der Stickstoff der am Feld verbleibenden Ernterückstände (IPCC 2006) berechnet werden, kommt in dieser Studie das Modellierungsprogramm LandscapeDNDC zum Einsatz. Dieses Programm ist in der Lage regionale Bewirtschaftung und Standortseigenschaften (Klimaverhältnisse, Bodeneigenschaften), die einen großen Einfluss auf den Stickstoffkreislauf haben, zu berücksichtigen (Schmidt *et al*. 2000, Butterbach-Bahl *et al*. 2013).

1.2 ÖPUL - rechtliche Rahmenbedingungen

Seit 1995 unterstützt das österreichische Agrar-Umweltprogramm ÖPUL *(Österreichisches Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft)* durch finanzielle Förderungen Maßnahmen zur umweltschonenden bzw. klimafreundlichen Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen. Im LE-Programm 2014-2020 gibt es einige Maßnahmen, zur Reduktion von Treibhausgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden. Dazu zählen die Maßnahmen des heimischen Agrarumweltprogramms ÖPUL 2015, die den verringerten Einsatz von Betriebsmitteln und die Etablierung weitgehend geschlossener Nährstoffkreisläufe zum Inhalt haben.

So werden beispielsweise im Rahmen der ÖPUL Maßnahmen „Biologische Wirtschaftsweise“ und „Einschränkung ertragssteigernder Betriebsmittel“ gänzlich auf den Einsatz von chemisch-synthetischen Düngemitteln verzichtet. Und auch im Rahmen der ÖPUL-Maßnahme „Vorbeugender Grundwasserschutz“ finden sich in Kombination mit Dünge-Bilanzierungen und Schulungen Verpflichtungen zur Düngereduktion. ÖPUL 2015 fasst die nationale Umsetzung der Artikel 28 (Agrarumwelt und Klimamaßnahmen), Artikel 29 (Ökologischer/Biologischer Landbau), Artikel 30 (Zahlungen im Rahmen von Natura 2000 und der Wasserrahmenrichtlinie) und Artikel 33 (Tierschutz) der Verordnung (EU) Nr. 1305/2013 zusammen.

Schwerpunkte des ÖPUL 2015 stützen sich vor allem auf die Wiederherstellung, Erhaltung und Förderung von Ökosystemen, welche von der Land- und Forstwirtschaft abhängen, sowie auf die Unterstützung von Ressourceneffizienz und auf den Wandel zu einem CO_2-armen, klimaresistenten Wirtschaften in Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. Zum Klimaschutz trägt beispielsweise auch die Erhaltung von Dauergrünland bei. Es gibt insgesamt fünfzehn Fördermaßnahmen die u.a. eine Reduktion von Treibhausgasemissionen aus landwirtschaftlichen Böden bewirken sollen. Für diese Studie sind mitunter die Maßnahmen bzgl. der Einschränkung des Gebrauchs ertragssteigender Betriebsmittel, sowie die Förderung der biologischen Wirtschaftsweise, jene Maßnahmen die wir betrachten. Es folgt die Beschreibung von den Bestimmungen, die in Rahmen der vorliegenden

Studie berücksichtigt wurden. Die Informationen wurden aus den entsprechenden Beschreibungen/Broschüren des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT 2012 und BMNT 2018) und der österreichische Agrarmarkt (AMA 2018) entnommen.

1.2.1 Beschreibung der für diese Studie aktuellen ÖPUL-Maßnahmen

1.2.1.1 *Cross Compliance (CC)* Bestimmungen Acker und Grünland

Ziel: *„Alle landwirtschaftlich genutzten Flächen – aber auch diejenigen, die vorübergehend nicht für die Erzeugung genutzt werden - müssen in gutem landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand (GLÖZ) erhalten werden. Nach den Anforderungen der EU muss sichergestellt werden, dass die landwirtschaftlichen Böden geschützt werden, durch geeignete Praktiken die Bodenstruktur und der Anteil der organischen Substanz im Boden erhalten bleiben, ein Mindestmaß an landschaftspflegerischen Instandhaltungsmaßnahmen getroffen und die Zerstörung von Lebensräumen vermieden wird. In der nationalen Horizontalen GAP-Verordnung sind entsprechende Mindeststandards nach den Vorgaben der Verordnung (EU) Nr. 1306/2013 festgelegt".*

<u>Wichtige Bestimmungen für diese Studie:</u>

Das Ausbringen von stickstoffhaltigen Düngemitteln auf landwirtschaftlich genutzten Flächen ist grundsätzlich mengenmäßig aber auch zeitlich begrenzt.

- *„verbindliche Obergrenzen für die jahreswirksame Stickstoffausbringungsmenge gemäß der Anlage 3 der NAPV in Abhängigkeit der Kulturart und der zu erwartenden Ertragslage einzuhalten.*
- *Das Ausbringen N-hältiger Düngemittel ist nicht zulässig auf: gefrorenen (Böden, die auch tagsüber nicht auftauen), auf wassergesättigten (Böden, die kein Wasser mehr aufnehmen), auf überschwemmten sowie auf schneebedeckten Böden (mindestens die Hälfte des Schlages ist schneebedeckt). Für folgende Zeiträume besteht jedenfalls ein Ausbringungsverbot für N-hältige Düngemittel*. In dieser Studie betrifft dies die Zeit zwischen 30.11 und 15.02.
- *Stickstoffdünger sind zeitlich und mengenmäßig bedarfsgerecht auszubringen: Stickstoffgaben am Hektar von mehr als 100 kg Nitrat-N, Ammonium-N oder Amid-N aus mineralischen Düngemitteln sowie mehr als 100 kg Ammonium aus Wirtschaftsdüngern in feldfallender Wirkung, sonstigen organischen Düngern oder Klärschlamm sind zu teilen".*

Auch wurde bei der Fruchtfolgezusammensetzungen die CC Bestimmungen eingehalten: es müssen mindestens drei unterschiedliche Kulturen in der Fruchtfolge sein, wobei zwei Kulturen nur weniger als 95% der Fläche ausmachen dürfen.

1.2.1.2 Reduzierte N-Düngung Acker – Düngeobergrenze

Einhaltung aller Bestimmungen der Nitrat-Aktionsprogramm-Verordnung (NAPV) mit dem Ziel, *„die durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen verursachte oder ausgelöste Gewässerverunreinigung zu verringern und weiteren Gewässerverunreinigung dieser Art vorzubeugen“.*

Diese Studie umfasst lt. o.a. Verordnung folgende Begriffsbestimmungen für Ackerland:

- **Ackerflächen: „***für den Anbau landwirtschaftlicher Kulturpflanzen genutzte landwirtschaftliche Nutzflächen oder für den Anbau landwirtschaftlicher Kulturpflanzen verfügbare, aber brachliegende Flächen, unabhängig davon, ob sich diese Flächen unter Gewächshäusern oder anderen festen oder beweglichen Abdeckungen befinden“.*
- **Ackerfutterflächen: „***Ackerflächen mit den Kulturen Futtergräser, Wechselwiesen, Kleegras, Klee, Luzerne, Energiegräser und sonstiges Feldfutter mit mehrjährigen Kulturpflanzen“.*

Weiter gibt es auch Einschränkungen in Bezug auf den Düngezeitpunkt (Auszug aus dem NAPV von 2018/WRG 1959):

„So ist das Ausbringen von stickstoffhaltigem, mineralischen Dünger, Gülle, Biogasgülle, Gärrückständen, Jauche etc. auf Dauergrünland und Ackerfutterflächen in der Zeit vom 30. November bis 15. Februar des Folgejahres, auf allen übrigen landwirtschaftlichen Nutzflächen in der Zeit vom 15. Oktober bis zum 15. Februar des Folgejahres verboten. Abweichend davon beginnt der Verbotszeitraum für die Ausbringung solcher stickstoffhältiger Stoffe auf Ackerflächen, auf denen bis 15. Oktober eine Folgefrucht oder Zwischenfrucht (ZF) angebaut worden ist, mit 15. November.

Das Ausbringen von Stallmist, Kompost, entwässertem Klärschlamm und Klärschlammkompost ist auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in der Zeit vom 30. November bis zum 15. Februar des Folgejahres verboten.

Allerdings ist für frühanzubauende Kulturen wie Durumweizen und Sommergerste, für Gründeckungen mit frühem Stickstoffbedarf wie Raps und Wintergerste und für Kulturen unter Vlies oder Folie eine Düngung bereits ab 1. Februar zulässig“.

In dieser Studie haben wir zusätzlich zu den laut NAPV kulturbestimmten Höchstdüngemengen (Variante konv_MAX) zwei weitere Szenarien mit einer um 15% (konv_-15%) und einer um -25% (konv_-25%) reduzierten N-Düngemenge simuliert.

1.2.1.3 *Umweltgerechte und biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung (UBB)* Acker

Ziel: *„Breite flächendeckende Biodiversitätswirkung durch den Erhalt von Landschaftselementen und die verpflichtende Anlage von Biodiversitätsflächen“.*

In dieser Studie wurden berücksichtigt:

- *„Fruchtfolgeauflagen auf Ackerflächen:*
    a. *Wenn die Ackerfläche des Betriebes mehr als 5 ha einnimmt, sind auf einer Fläche von zumindest 25% der Ackerfläche andere Kulturen als Getreide und Mais anzulegen und keine Kultur darf mehr als 66% Anteil an der Ackerfläche haben (ausgenommen Ackerfutter).*
    b. *Wenn die Ackerfläche des Betriebes mehr als 30 ha einnimmt, sind zusätzlich zu den Vorgaben gemäß Punkt a) mindestens drei verschiedene Kulturen anzulegen (ausgenommen Anteil Ackerfutterflächen größer 66%); wobei Biodiversitätsflächen auf Acker nicht als eigene Kultur zählen.*
- *Anlage von Biodiversitätsflächen auf Acker- und Grünlandflächen:*
    a. *Ab einer Summe von 2 ha aus Acker- und gemähter Grünlandfläche (ohne Bergmähder) sind auf zumindest 5% der Summe aus Acker- und gemähter Grünlandfläche (ohne Bergmähder) des Betriebes Biodiversitätsflächen anzulegen.*
    b. *Ab einer Ackerfläche von 15 ha sind Biodiversitätsflächen auf zumindest 5% der Ackerflächen anzulegen.*
    c. *Biodiversitätsflächen auf Ackerflächen:*
        - *die Neuansaat hat bis spätestens 15.05. des Kalenderjahres zu erfolgen, Umbruch frühestens am 15.09. des 2. Jahres;*
        - *Mahd/Häckseln mindestens 1x, maximal 2x pro Jahr, auf 50% der Biodiversitätsflächen frühestens am 01.08. auf den anderen 50% ohne zeitliche Einschränkungen; Verbringung des Mähgutes erlaubt; Beweidung und Drusch sind nicht erlaubt;*
        - *Die Beseitigung von geförderten Biodiversitätsflächen darf nur mit mechanischen Methoden (Häckseln oder Einarbeiten) erfolgen".*

1.2.1.4 UBB (Umweltgerechte und biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung) Grünland*:*

Ziel: *„Breite flächendeckende Biodiversitätswirkung durch den Erhalt von Landschaftselementen und die verpflichtende Anlage von Biodiversitätsflächen"*

In dieser Studie wurden berücksichtigt:

- *„Anlage von Biodiversitätsflächen auf Acker- und Grünlandflächen:*

a. *Ab einer Summe von 2 ha aus Acker- und gemähter Grünlandfläche (ohne Bergmähder) sind auf zumindest 5% der Summe aus Acker- und gemähter Grünlandfläche (ohne Bergmähder) des Betriebes Biodiversitätsflächen anzulegen.*

e. Biodiversitätsflächen auf gemähten Grünlandflächen (ohne Bergmähder):

- *Erste Mahd frühestens mit der zweiten Mahd von vergleichbaren Schlägen oder einmähdige Wiese (ohne Bergmähder). Frühestens ist eine Mahd ab dem 01.06. und jedenfalls ist eine Mahd ab dem 01.07. zulässig; eine Beweidung vor der ersten Mahd ist nicht erlaubt*
- *Das Mähgut ist von der Fläche abzutransportieren;*
- *Verzicht auf Ausbringung von Düngern vor der ersten Nutzung (Mahd);*
- *Die Biodiversitätsfläche ist über den gesamten Verpflichtungszeitraum am gleichen Standort zu belassen, wird die Biodiversitätsfläche weitergegeben oder die landwirtschaftliche Nutzung aufgegeben, so kann als Ersatz ausnahmsweise auf einer anderen, am Betrieb verbleibenden Fläche eine Biodiversitätsfläche angelegt werden".*

1.2.1.5 Biologische Bewirtschaftung Acker und Grünland

„Die biologische Kreislaufwirtschaft, ohne Gebrauch chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel und Mineraldünger, fördert die Erhaltung von Strukturelementen und wirkt sich positiv auf die betrieblichen Nährstoffzyklen aus. Es werden vielfältige Landschaftselemente, Tier- und Pflanzenarten gefördert. Humusmehrende Fruchtfolgen erhöhen den Bodenkohlenstoffgehalt (C wird aus der Atmosphäre im Boden gebunden) und dies trägt wiederum zum Klimaschutz bei.

Ziele:

- *Erhaltung und Steigerung der pflanzlichen und tierischen Biodiversität österreichischer Kulturlandschaften sowie eine umwelt- und ressourcenschonende Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Flächen*
- *Etablierung betrieblicher Nährstoffkreisläufe, Reduktion des Einsatzes von chemisch-synthetischer Pflanzenschutz- und Düngemittel sowie damit verbundene Reduktion stofflicher Einträge in Gewässer*
- *Steigerung der Bodenfruchtbarkeit, Etablierung und Erhaltung vielfältiger Fruchtfolgen sowie Erhaltung des Dauergrünlandes und damit verbundene Reduktion von Treibhausgasemissionen"*

Bestimmungen die wir eingehalten haben neben den Verzicht auf mineralischem N Dünger und eine möglichst vielfältige Fruchtfolge:

- *„Analog den Bestimmungen der Maßnahme „Umweltgerechte und biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung" kann die Anlage von Biodiversitätsflächen auf Acker erfolgen. Die Mindestflächenvorgaben gelten nicht.*

1.3 Vorhaben

In der geplanten Studie wird überprüft, ob konkrete ÖPUL Maßnahmen zu einer Reduktion von Treibhausgasemissionen führen. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf den N_2O-Emissionen.

Im Detail wird in fünf ausgewählten Kleinproduktionsgebieten Folgendes überprüft:

- Wie stark sinken N_2O-Emissionen, wenn die Düngerintensität (z.B. insbesondere die Stickstoffzufuhr) reduziert wird? Sinken die N_2O-Emissionen proportional zu der Reduktion der N-Düngemenge?
- Wie unterscheiden sich N_2O-Emissionen bei intensiv konventionell sowie reduziert konventionell bewirtschafteten und bei intensiv biologisch bewirtschafteten Acker- und Grünlandböden?
- Sind die N_2O-Emissionen (N_2O-N ha^{-1} a^{-1}) bei einer extensiveren Fruchtfolge mit integrierten UBB Flächen (Umweltgerechte und biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung) niedriger als bei einer intensiv bewirtschafteten Fruchtfolge ohne UBB Flächen?

Dieser Vergleich der unterschiedlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen dient als Grundlage für zukünftige Forschungsprojekte, in denen die Auswirkungen der österreichweiten Landnutzung und Landnutzungsänderungen anhand von Modellberechnungen und Messungen auf ihren Klimaeffekt untersucht werden sollen.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Untersuchungsgebiet – Geographie

2.1.1 Lage

Auf Grund der vielfältigen Landschaftsräume und Klimaregionen herrschen in Österreich sehr unterschiedliche Produktionsvoraussetzungen für die landwirtschaftlichen Betriebe vor. Aus diesem Anlass wurde das Staatsgebiet in den 1950er und 60er Jahren in landwirtschaftliche Haupt- und Kleinproduktionsgebiete unterteilt. 1990 wurde eine Neuabgrenzung durchgeführt, die bis heute gültig ist. Die Abgrenzung in Kleinproduktionsgebiete (KPG) erlaubt die Berücksichtigung von stabilen naturräumlichen Kriterien bzw. den wichtigsten landwirtschaftlichen Gegebenheiten anstelle von höherrangigen Verwaltungseinheiten und führt dadurch zu verlässlicheren Aussagen statistischer Auswertungen. Basierend auf der geographischen Lage, stellt das Kleinproduktionsgebiet somit ein homogenes Gebiet dar, das eine räumlich zusammenhängende Einheit bildet (Wagner 1990).

Für dieses Projekt wurden fünf Kleinproduktionsgebiete ausgewählt, die sich auf Grund ihrer unterschiedlichen klimatischen und landwirtschaftlichen Bedingungen wesentlich voneinander

unterscheiden. Diese sind: Ennstal und Seitentäler (ET), Flachgau (FL), Marchfeld (MF), Grieskirchen Kremsmünster Gebiet (GK) und Oststeirisches Hügelland (OH) siehe Abbildung 1.

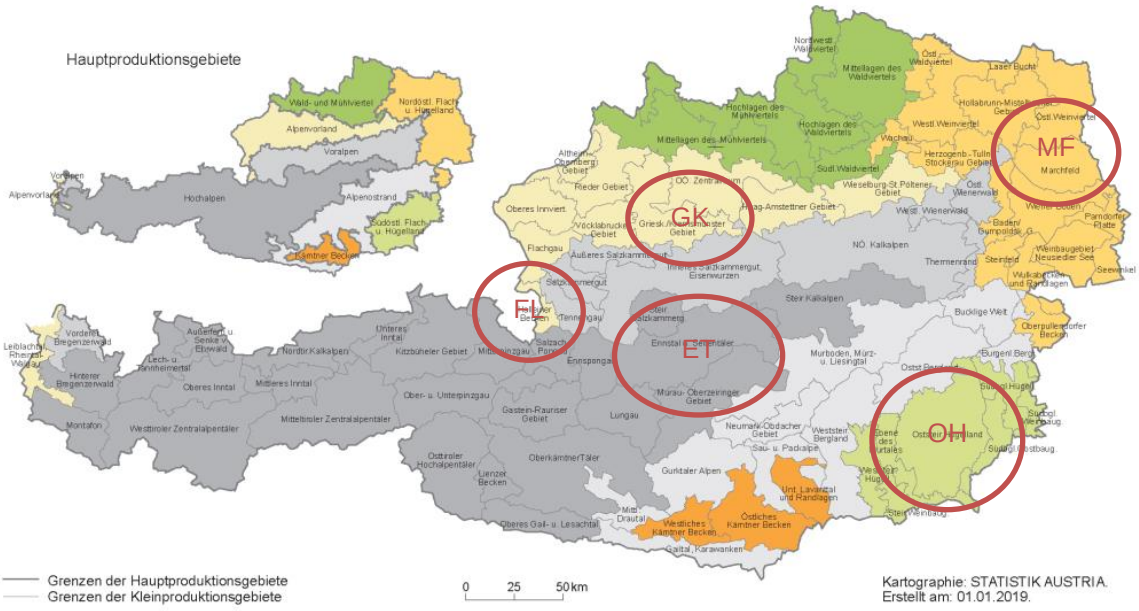


Abbildung 1: Landwirtschaftliche Haupt- und Kleinproduktionsgebiete Österreichs, Gebietsstand 2019 mit den ausgewählten Regionen ET = Ennstal, FL = Flachgau, GK = Grieskirchen Kremsmünster Gebiet, MF = Marchfeld und OH = Oststeirisches Hügelland.

Nach Hölzel (2006) bedeckt das Kleinproduktionsgebiet Ennstal und Seitentäler (ET) 2250 km^2 und zählt zum Hauptproduktionsgebiet Hochalpen, das fast gänzlich aus alpinem Grünland besteht. Hier ist die wirtschaftliche Grundlage die Viehwirtschaft, die zu meist in Form flächenintensiver Rinderhaltung und Grünlandwirtschaft betrieben wird. Besonders die Talböden werden hierfür genutzt. Im Flachgau (FL) überwiegt die Grünlandwirtschaft. In diesem 570 km^2 großem Gebiet spielt der Futtermittelanbau als Basis einer intensiven Viehhaltung, die auf Zucht, Mast und Milchleistung basiert, eine wesentliche Rolle.

Das Gebiet Grieskirchen Kremsmünster (GK) ist 1350 km^2 groß und zählt wie der Flachgau (FL) zum Alpenvorland, allerdings ist hier nicht mehr das Grünland, sondern das Ackerland von größerer Bedeutung. Hier verlieren die Rinderbestände und die Milchwirtschaft zu Gunsten der Schweinehaltung an Bedeutung.

Das Marchfeld (MF) wird dem nordöstlichen Flach- und Hügelland zugeordnet. In diesem 900 km^2 großen Kleinproduktionsgebiet herrschen geringe Niederschläge und hohe Sommertemperaturen vor. Hier steht der Ackerbau, als viehlose Wirtschaftsform, im Vordergrund. Der Anbau von Gemüse und Sonderkulturenprägen das Landschaftsbild.

Das Oststeirische Hügelland (OH) liegt im südöstlichen Flach- und Hügelland und erstreckt sich über 2230 km^2. Durch den Einfluss des Illyrischen Klimas ist hier der Ackerbau vorherrschend. Der Anbau von Körnermais spielt eine tragende Rolle. Im Gegensatz zum Marchfeld mischt sich die Viehwirtschaft, vor allem die Schweine- und Geflügelhaltung, mit dem Ackerbau. Der großflächige Anbau von Kürbis zur Ölgewinnung ist, wie der traditionelle Anbau von Wein und Obst, eine regionale Besonderheit.

2.1.2 Böden

Um Angaben zu den wichtigsten Bodentypen der ausgewählten Regionen zu erhalten, wurde die eBOD Datenbank (Bundesforschungszentrum für Wald 2013) genutzt. Die eBOD ist eine digitale Bodenkarte, die eine Fülle von Bodenparametern für die von der Bodenkartierung erfassten Acker- und Grünlandböden Österreichs beinhaltet. Weitere Informationen über die Bodenfeuchte und die Boden-Wasserleitfähigkeit wurden vom Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen (BAW) zur Verfügung gestellt. Die Lagerungsdichte wurde aus dem Gehalt des organischen Bodenkohlenstoffs (C_{org}) mit der Pedotransfer-Funktion von Manrique und Jones (1991) berechnet: 1.66 – 0.318 * % OC ^0.5. Bei Ackerböden wurden die im Oberboden gemessenen Werte eingesetzt. Bei den Grünlandböden ändert sich der C_{org} Gehalte sehr rasch mit der Tiefenstufe. Daher wurden im Modell die Werte auf 0-5, 5-10 und 10 -20 cm umgerechnet.

Die Böden sind vorwiegend sandig lehmige Böden mit Tongehalten zwischen 0-33%. Ackerböden haben im Oberboden einen C_{org} Gehalt zwischen 0.8 und 2.1%. Bei den Grünlandböden liegen die C_{org} Gehalte im Oberboden zwischen 2.4 und 5.5% (Tabelle 1)

Tabelle 1: Bodenparameter der ausgewählten Bodentypen

Region	L	Bodenart	Bodentiefe [cm]	pH [$cacl_2$]	C_{org} [%]	Ton [%]	Sand [%]	LD [g cm^{-3}]	Skel [%]	FK [mm m^{-3}]	WP [mm m^{-3}]
Ennstal	Grünland	LOSA	0-5	4.5	2.8	6	44	1.1	20	395	26
		SALO	0-5	4.6	4.4	12	30	1.0	20	412	25
		SILT	0-5	6.6	4.1	13	5	1.0	0	470	29
Flachgau	Grünland	LOSA	0-5	5.4	4.3	12	43	1.0	5	437	26
		LOSI	0-5	5	5.5	22	20	0.9	0	550	29
		SALO	0-5	5.2	5.4	15	32	1.0	5	466	27
Grieskirchen	Ackerland	LOSA	0-25	6.8	1.3	12	48	1.3	0	410	29
		LOSI	0-25	6.7	1.3	33	13	1.3	0	430	24
		LOSI	0-25	5.7	1.8	18	15	1.2	0	430	24
		SASI	0-20	6.0	1.3	14	25	1.3	5	409	26
		SILT	0-20	6.5	1.6	12	7	1.3	0	425	28
	Grünland	LOSA	0-5	5.2	1.8	8	52	1.2	10	366	26
		LOSI	0-5	4.6	4.3	22	12	1.0	0	490	26
		SALO	0-5	5.3	3.4	17	35	1.1	0	455	31
		SILO	0-5	5.8	2.8	27	12	1.1	10	508	24
Marchfeld	Ackerland	LOSA	0-30	7.5	1.1	9	46	1.3	0	395	26
		LOSA	0-25	6.1	0.8	14	56	1.4	0	345	21
		LOSI	0-30	7.5	1.9	18	24	1.2	0	475	23
		SALO	0-25	7.7	1.5	19	40	1.3	1	445	30
Stmkost	Ackerland	LOSA	0-20	6.9	1.6	11	57	1.3	0	340	23
		LOSI	0-25	5.6	2.1	16	16	1.2	0	415	27
		SALO	0-20	5.2	1.8	18	35	1.2	0	445	23
	Grünland	LOSA	0-5	6.0	3.7	11	39	1.0	15	366	23
		LOSI	0-5	4.5	3.7	22	14	1.0	10	390	27
		SILO	0-5	4.7	3.5	33	8	1.1	0	625	27

L= Landnutzung, LD=Lagerungsdichte, Skel= Skelettanteil > 2 mm, hc= Wasserleitfähigkeit, FK= Feldkapazität, WP= Welkepunkt.

2.1.3 Klima

Alle Klimadaten, wie Lufttemperatur (Durchschnitt, Minimum, Maximum), Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Windstärke und globale Einstrahlung wurden in täglicher Auflösung von 7 regionalen ZAMG-Wetterstationen zur Verfügung gestellt (2005-2014).

Nach der Einteilung von Resl und Brückler (2016) liegen die Kleinproduktionsgebiete ET, FL und GK in feuchteren Gebieten, OH in einem Gebiet, das gelegentlich trocken ist und MF in einem Trockengebiet (Abbildung 2).

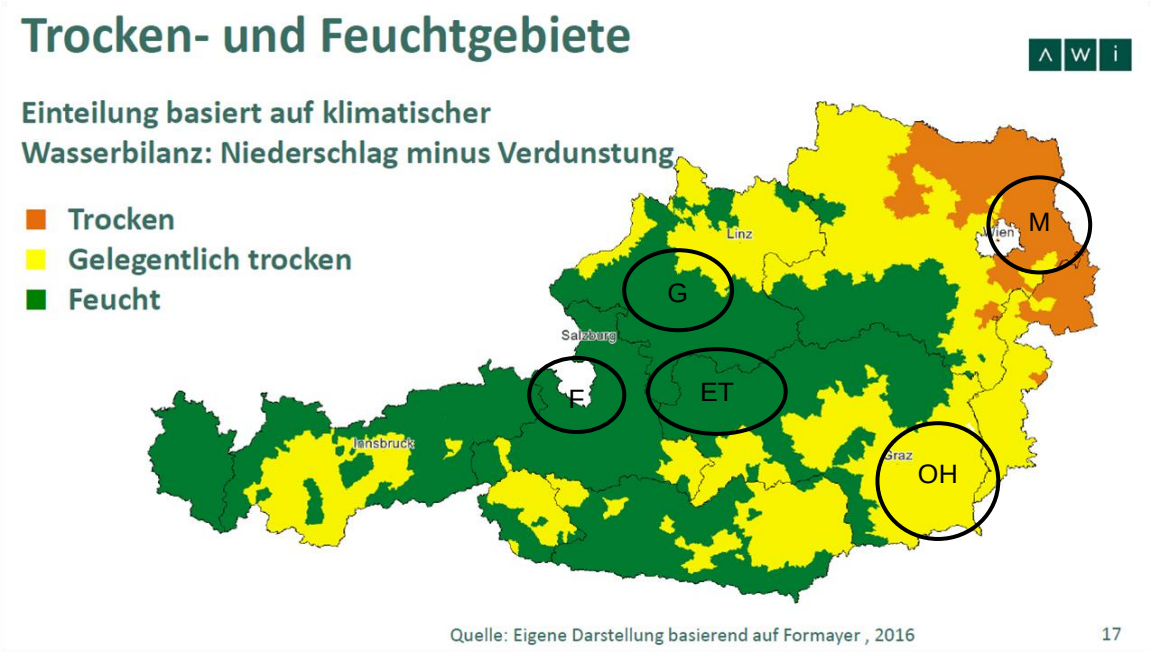


Abbildung 2: Lage der modellierten Regionen in den Trocken- und Feuchtgebieten Österreichs (aus Resl & Brückl 2016)

In der Tabelle 2 sind die klimatischen Parameter angeführt. Dies sind der mittlere Jahresniederschlag; die mittlere, minimale und maximale Lufttemperatur, die Globalstrahlungs-Mittelwerte, sowie Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit der Simulationsperiode 2005 - 2014. Abbildung 3 zeigt, dass in allen Regionen die Jahre 2005, 2006 und 2010 die niedrigsten und 2007, 2008 und 2014 (bis auf FL) die höchsten mittleren Jahrestemperaturen aufweisen. In den klimatisch feuchteren Gebieten (ET, FL und GK) waren 2007 und 2009 die feuchtesten Jahre und 2008 und 2010 die trockensten Jahre. Im OH war es 2005 bis 2008 trockener als in den Jahren 2009 bis 2014. Das feuchteste Jahr war 2014. Im Trockengebiet MF waren die Jahre 2011 bis 2013 besonders trocken mit mittlerem Jahresniederschlag unter 480 mm; im Gegensatz dazu waren 2010 und 2014 die feuchtesten Jahre mit Jahresniederschlägen zwischen 650 und 790 mm.

Tabelle 2: Durchschnittliche, jährliche Klimadaten der ZAMG Wetterstationen (2005 – 2014)

Region	ZAMG Station	MJNS [mm]	MJT [°C]	T_{max} [°C]	T_{min} [°C]	GLOB [W m^{-2}]	RF [%]	Wind [m s^{-1}]
Ennstal	Aigen	967	8.3	34.0	-18.9	141	75	8.8
Ennstal	Irdning	1230	8.5	33.9	-17.0	135	81	9.3
Flachgau	Mattsee	1275	9.7	33.3	-14.8	132	80	8.8
Grieskirchen	Kremsmünster	1026	10.3	34.5	-13.5	129	77	8.7
Marchfeld	Gänserndorf	537	10.9	35.7	-14.9	135	72	8.3
Marchfeld	Grossenzersdorf	591	11.3	35.2	-13.7	140	71	8.2
Oststeirisches Hügelland	Hartberg	783	10.7	34.6	-15.0	137	73	8.6

MJNS= Mittlerer Jahresniederschlag in mm; MJT= mittlere Jahrestemperatur in °C; T_{max} = gemittelte Maximaltemperatur in °C; T_{min} = gemittelte Minimaltemperatur in °C; GLOB = Globalstrahlung in W m^{-2}; RF = relative Feuchtigkeit in %; Wind = Windgeschwindigkeit in m s^{-1}

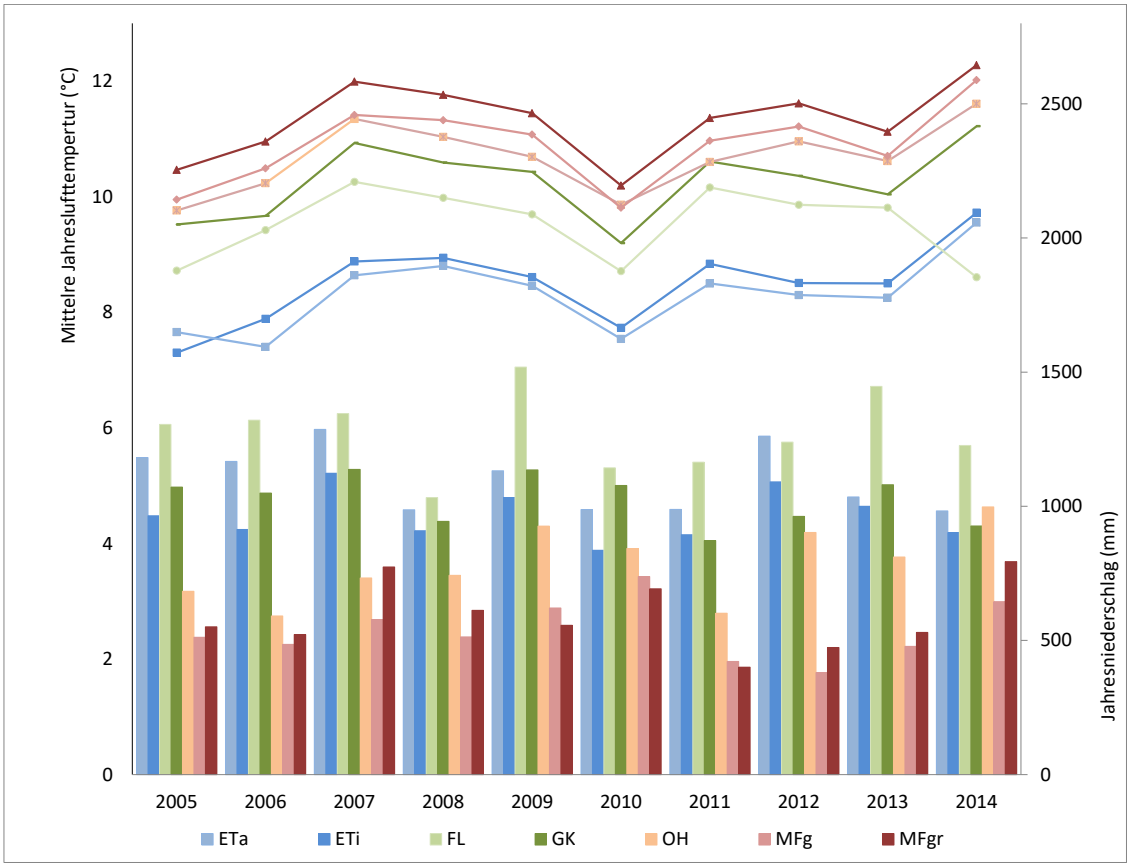


Abbildung 3: Mittlere Jahrestemperatur (Linien) und Niederschlagssumme (Balken) in den Jahren 2005 – 2014 aller Wetterstationen der Regionen. ETa= Ennstal, Aigen; ETi=Ennstal, Irdning; FL=Flachgau; GK=Grieskirchen; OH=Ostesteirisches Hügelland; MFg=Marchfeld Gänserndorf; MFgr=Marchfeld, Großenzersdorf

2.1.4 Flächenverteilung

Die wichtigsten bzw. flächenmäßig vorherrschenden Kulturen jeder Region wurden anhand der zur Verfügung gestellten INVEKOS (Integriertes Verwaltung- und Kontrollsystem) Datensätze (Durchschnittswerte der Flächenanteile der Kulturen bzw. Kulturgruppen über den Betrachtungszeitraum) für die Modellierungen herangezogen. Das Auswahlkriterium war, dass die wichtigsten Kulturen gemeinsam mehr als 80% der landwirtschaftlichen Nutzfläche in den Untersuchungsgebieten umfassen. Kulturen mit sehr geringen Flächenanateilen und Kulturen, deren physiologische Daten nicht im Datengerüst des Modells enthalten waren, wurden nicht berücksichtigt.

Beim Grünland wurden intensiv bewirtschaftete Flächen (3 und mehr Schnitte) abgebildet, da unter extensiver Bewirtschaftung die N_2O Emissionen von geringerer Bedeutung sind.

Die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche (biologisch und konventionell) beläuft sich im ET auf 35.000 ha, FL 30.000 ha, GK 87 000 ha, MF 53 500 ha und OH auf 96 000 ha. Da der Hauptfokus in dieser Studie bei der Betrachtung der Hauptkulturen (Ackerland und intensives Grünland) liegt, werden von den gesamten landwirtschaftlichen Nutzflächen im ET 33%, FL 82%, GK 81%, MF 77% und OH 65% für die Modellierung herangezogen. Der durchschnittliche Anteil der vorherrschenden Hauptkulturen der landwirtschaftlichen Flächen (konventionelle und biologische Bewirtschaftung) ist in Abbildung 4 je nach Region dargestellt.

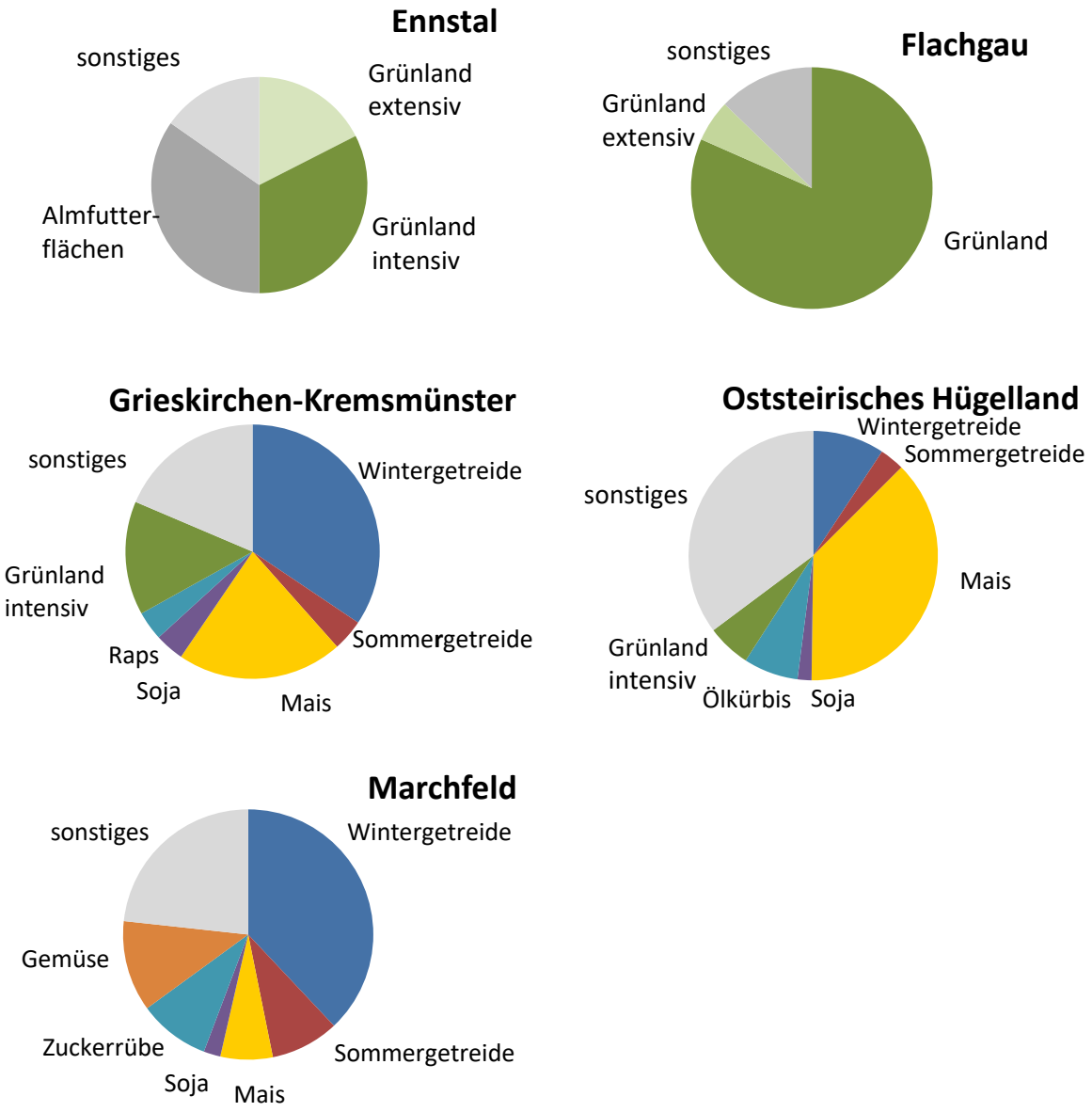


Abbildung 4: Durchschnittlicher Anteil der vorherrschenden Kulturen von den gesamten landwirtschaftlichen Nutzflächen (2005 – 2017) in den gewählten Regionen.

Die Produktionsgebiete GK, MF und OH sind typische Ackerbauregionen, die durch den großflächigen Anbau von Getreide und Mais geprägt sind, ET und FL dagegen sind typische Grünlandregionen. Aufgrund der natürlichen Gegebenheiten werden in den Regionen zumeist jene Kulturen angebaut, die an diese Verhältnisse angepasst sind bzw. entsprechende Erträge einbringen. Die Flächenverteilung hat sich aber in den letzten Jahren in einigen Regionen stark verändert. Besonders im Ackerland im OH kam es zu einer starken Abnahme der Maisflächen (detaillierte Abbildungen im Anhang). Grund dafür ist die Verbreitung des Maiswurzelbohrers. Um die Ausbreitung dieses Schädlings einzudämmen, gibt es seit 2004 die Maiswurzelbohrerverordnung. In der aktuellen Fassung LGBl. Nr. 22/2015 (Land Steiermark 2015), wird vorgeschrieben, dass Mais auf einer Ackerfläche höchstens zweimal in Folge angebaut werden darf.

2.2 Nutzung Acker

2.2.1 Fruchtfolge

In jeder Region wurden für die Modellierung bei den drei unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen „konventionell“ (konv_MAX), „konventionell mit Teilnahme an der ÖPUL Maßnahme UBB“ (konv_UBB) und die „biologische Bewirtschaftung“ (biologisch) regionaltypische Ackerfruchtfolgen für den betrachteten Zeitraum zusammengestellt. Die erfolgte auf Basis der INVEKOS-Daten, ergänzt durch die Expertise von Beratern (LK, BBK und Bio Austria). Die vielgliedrigen Fruchtfolgen bilden die Anteile der vorherrschenden Ackerkulturen (Tabelle 3) prozentuell (100% mit einer Schwankung von +/- 1 bis 2%) in den drei Ackerbauregionen ab.

Tabelle 3: Anteil der Feldfrüchte zur Erstellung der Fruchtfolgen in den drei Ackerbauregionen Marchfeld, Grieskirchen und Oststeirisches Hügelland

Anteil in den Fruchtfolgen: Grieskirchen					
	konv_MAX		konv_UBB		biologisch
% Anteil	Kultur	% Anteil	Kultur	% Anteil	Kultur
50	Wintergetreide	35	Wintergetreide	48	Wintergetreide
31	Mais	24	Mais	11	Mais
6	Raps	12	Raps	6	Erdäpfel
6	Sommergetreide	12	Sommergetreide	11	Sommergetreide
6	Soja	6	Soja	10	Soja
		6	Zuckerrübe	14	Begrünung
		6	Begrünung		

Anteil in den Fruchtfolgen: Marchfeld					
	konv_MAX		konv_UBB		biologisch
% Anteil	Kultur	% Anteil	Kultur	% Anteil	Kultur
48	Wintergetreide	48	Wintergetreide	47	Wintergetreide
10	Mais	11	Mais	11	Mais
14	Gemüse	11	Gemüse	16	Gemüse
14	Zuckerrübe	11	Zuckerrübe	10	Soja
10	Sommergetreide	11	Sommergetreide	5	Sommergetreide
5	Soja	5	Soja	10	Begrünung
		5	Begrünung		

Anteil in den Fruchtfolgen: Oststeirisches Hügelland					
	konv_MAX		konv_UBB		biologisch
% Anteil	Kultur	% Anteil	Kultur	% Anteil	Kultur
19	Wintergetreide	17	Wintergetreide	40	Wintergetreide
57	Mais	49	Mais	20	Mais
13	Ölkürbis	17	Ölkürbis	13	Ölkürbis
6	Sommergetreide	6	Sommergetreide	7	Sommergetreide
6	Soja	6	Soja	9	Soja
		6	Begrünung	11	Begrünung

Bei der Erstellung der Fruchtfolgen wurde auf die gute landwirtschaftliche Praxis mit möglichst regelmäßiger Abwechslung zwischen Sommerungen und Winterungen, zwischen Hackfrucht und Getreide und auf Einhaltung der Anbaupausen vor allem nach dem Anbau von Leguminosen zur Vermeidung Fruchtfolgekrankheiten geachtet.

Das Modell berücksichtigt den Vorfruchtwert über die C und N Flüsse im Boden. Um den klimatischen Einfluss auf die Vorfruchtwirkung zu minimieren sind alle Kulturen in ihrer Fruchtfolgeposition in allen Jahren simuliert. Jedes Fruchtfolgeglied steht somit bei der Berechnung einer gesamten Fruchtfolge über 10 Jahre (2005 – 2014) am Beginn der Simulation. Dadurch ergeben sich gleich viele Simulationen wie Fruchtfolgeglieder.

Es folgt die Auflistung der Fruchtfolgen inklusive Zwischenfrüchte (ZF):

2.2.1.1 Fruchtfolgen in Grieskirchen:

Konventionelle Bewirtschaftung: Mais – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Mais – Mais – Wintergetreide – Wintergetreide – Winterraps – ZF – Mais – Sojabohne – Wintergetreide – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF -

Konventionelle Bewirtschaftung mit UBB: Begrünung – Begrünung – Mais – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – Wintergetreide – Winterraps – ZF - Zuckerrübe – Mais – Mais – Wintergetreide – Wintergetreide – Winterraps – ZF – Sojabohne – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF - Zuckerrübe - Mais – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Mais – Mais – Wintergetreide – Wintergetreide – Winterraps – ZF – Sojabohne – Wintergetreide – Winterraps – ZF – Sommergetreide – ZF -

Biologische Bewirtschaftung: Begrünung – Begrünung – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF - Mais – Sojabohne – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF - Sommergetreide – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Mais – Sojabohne – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Sommergetreide – ZF – Begrünung – Begrünung – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Sojabohne – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Erdäpfel -

2.2.1.2 Fruchtfolgen in Marchfeld

Konventionelle Bewirtschaftung: Wintergetreide – ZF – Zuckerrübe – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – ZF – Gemüse – Sojabohne – Wintergetreide – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Zuckerrübe – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – ZF – Gemüse – Zuckerrübe – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Gemüse – Wintergetreide – Wintergetreide -

Konventionelle Bewirtschaftung mit UBB: Begrünung – Begrünung – Wintergetreide – ZF – Zuckerrübe – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – ZF – Gemüse – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Sojabohne – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Zuckerrübe – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – ZF – Gemüse – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Sojabohne – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Zuckerrübe – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – ZF – Gemüse – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF -

Biologische Bewirtschaftung: Begrünung – Begrünung – Wintergetreide – ZF – Gemüse – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – ZF – Gemüse – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF –

Sojabohne – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Mais – Sojabohne – Wintergetreide – ZF – Gemüse – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF -

2.2.1.3 Fruchtfolgen in Oststeirisches Hügelland

Konventionelle Bewirtschaftung: Mais – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – ZF – Mais – Mais – Sojabohne – Mais – Mais – Ölkürbis – Wintergetreide – ZF – Mais – Mais – Ölkürbis – Mais – Wintergetreide – ZF -

Konventionelle Bewirtschaftung mit UBB: Begrünung – Begrünung – Mais – Mais – Ölkürbis – Wintergetreide - ZF – Mais – Mais – Ölkürbis – Mais – Mais – Sojabohne – ZF – Mais – Ölkürbis – Wintergetreide – ZF - Mais – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – ZF - Mais – Mais – Sojabohne – ZF – Mais – Ölkürbis – Wintergetreide – ZF – Mais – Mais – Sommergetreide – Wintergetreide – ZF – Mais – Ölkürbis – Wintergetreide – ZF – Mais – Mais – Ölkürbis -

Biologische Bewirtschaftung: Begrünung – Begrünung – Wintergetreide – ZF – Mais – Kürbis – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF - Mais – Sojabohne – Wintergetreide – ZF – Mais - Sommergetreide – Begrünung – Begrünung – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Mais – Ölkürbis – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF – Sojabohne – Wintergetreide – Wintergetreide – ZF - Mais – Wintergetreide – ZF – Sommergetreide – ZF - Sojabohne – Wintergetreide - ZF – Mais – Ölkürbis -

Bei den Simulationen ist die Begrünung in GK und OH eine Kleegrasmischung und im MF ein Luzernebestand. Die Begrünung wird im ersten Jahr im Frühling angebaut und sehr extensiv genutzt. Im ersten Jahr wird nur einmal geschnitten und im zweiten Jahr zwei Mal wobei die erste Nutzung immer erst Ende Juni stattfindet. Der Umbruch folgt im zweiten Jahr nach dem 15. September (Einhaltung der UBB Bestimmungen für Biodiversitätsflächen)

Der Anteil an Zwischenfrucht (ZF) in der Fruchtfolge liegt unter konventioneller Bewirtschaftung bei ca. 20%, bei der Maßnahme UBB konventionell bei 23 – 25% und bei der biologischen Bewirtschaftung sind es bis zu 30%.

Stellvertretend für Gemüse wurde in MF die Kultur Zwiebel simuliert.

Bei der Modellierung sind kulturspezifische Zeiten für Bodenbearbeitung, Anbau, Düngen und Ernte sowie Düngemenge und Ernterückstände angegeben. Die Bearbeitungszeiten wurden in Abstimmung mit Experten als auch auf das aktuelle Wetter angepasst.

2.2.2 Ertrag

GK und OH werden als hohe Ertragslage, MF als mittlere Ertragslage eingestuft. Es wurden regionsspezifische mittlere jährliche Erträge der Kulturen verwendet um das simulierte Pflanzenwachstum der unterschiedlichen Kulturen im Modell an den regionalen Erträgen anzupassen. Die Ertragsdaten der verschiedenen, regionalen Erhebungsdaten für die Jahre 2005 – 2014 stammen von der Statistik Austria und sind in Tabelle 4 gelistet.

Tabelle 4: Mittlere regionale Erträge mit Standardabweichung (StAw) der Jahre 2005 bis 2014 und prozentueller Anteil erwarteter, biologischer Erträge der simulierten Kulturen. N= Anzahl der regionalen Ertragsdaten pro Jahr.

Region	Kultur	konventionell[1] dt TM ha^{-1}			biologisch von konventionell[2]
		Mittelwert	StAw	N	%
GK	Erdäpfel*	57.9	(10.7)	4	58
	Gerste	36.3	(4.9)	4	69
	Mais	86.1	(8.4)	4	62
	Soja	26.2	(2.4)	4	100
	Wintergerste	52.1	(4.5)	4	65
	Winterraps	36	(4.5)	4	-
	Winterweizen	55.9	(6.2)	4	55
	Zuckerrübe	236.2	(22.5)	4	-
MF	Gerste	45.6	(7.5)	6	63
	Zuckerrübe	229.8	(16.5)	6	-
	Mais	93	(9.5)	6	75
	Soja	23.2	(3.6)	6	100
	Zwiebel	40	(0.0)	1	71
	Wintergerste	54.7	(7.5)	6	63
	Winterweizen	42.7	(6.4)	6	73
OH	Gerste	43.3	(3.7)	5	69
	Mais	94	(6.7)	5	65
	Ölkürbis	5.2	(1.2)	5	81
	Soja	28.4	(3.4)	5	100
	Winterweizen	54	(8.2)	5	58

[1] Daten der Statistik Austria; [2] % Anteil biologischer Erträge (gemessen an konventionellen Erträgen lt. Resl und Brückler, 2016), * bei den Erdäpfeln wird hier einen C-gehalt von 45% und einen Trockengehalt von 22% der Frischmasse angenommen.

2.2.3 Düngung

Bei der Modellierung konventioneller Ackerflächen wurde in der Absprache mit dem Auftragsgeber zur Vereinfachung nur mineralischer Dünger angenommen bzw. sind die ausgebrachten N-Mengen in die Berechnungen eingeflossen. Nach Rücksprache mit landwirtschaftlichen Beratern der Kammern (LK und BBK) und von BioAustria, sowie mit einigen Praktikern wurden für die biologischen Ackerkulturen durchschnittliche Düngemengen und daraus folgenden für die Bewirtschaftung verfügbaren Stickstoffmengen geschätzt. Die Schätzungen standen Teils aus Projektberichten (z.B. Versuchsreferat Steiermark, MUBIL und HUMUS-Projekt) zur Verfügung bzw. wurden die regionaltypischen Wirtschaftsweisen von Berater in der Region erläutert.

In Tabelle 5 sind die durchschnittlichen, jährlichen N Düngemengen (kg N ha^{-1}) über die ganze Fruchtfolgerotation in allen Jahren 2005 bis 2014 gelistet. Die höchsten Düngemengen fallen bei der Maßnahme konv_MAX in GK an. In konv_UBB wird im Schnitt etwas weniger gedüngt und die Düngemengen der biologischen Varianten entsprechen einem Drittel jener Mengen der konv_MAX und etwa derer Hälfte der konv_-25%. In den konv_MAX und konv_UBB Bewirtschaftungsvarianten

wurden die Höchstdüngemengen der einzelnen Kulturen laut NAPV angenommen. In der Tabelle 6 sind die detaillierten Düngemengen pro Kultur aller simulierten Bewirtschaftungsvarianten gelistet.

Tabelle 5: Übersicht der durchschnittlichen Düngemengen (kg N ha^{-1} yr^{-1}) in den verschiedenen Bewirtschaftungsvarianten je Region und Landnutzung.

Region	konv_MAX	konv_-15%	konv_-25%	konv_UBB	biologisch
			[kg N ha^{-1}]		
GK	157	133	118	145	66
MF	136	116	102	116	44
OH	153	130	115	141	55

Tabelle 6: Übersicht der Düngemengen in den modellierten Regionen je Ackerkultur und Bewirtschaftungsvariante

Region	Kultur	konv_MAX [kg N ha^{-1}]	konv_-15% [kg N ha^{-1}]	konv_-25% [kg N ha^{-1}]	konv_UBB [kg N ha^{-1}]	biologisch [kg N ha^{-1}]
GK	BEGRÜNUNG					
	ERDÄPFEL					80
	MAIS	180	153	135	180	120
	RAPS	180	153	135	180	
	SOMMERGERSTE	130	111	98	130	
	SOYABOHNE					
	WINTERGERSTE	155	132	116	155	110
	WINTERWEIZEN	170	145	128	170	130
	ZUCKERRÜBE					
MF	BEGRÜNUNG					
	MAIS	155	132	116	155	73
	SOMMERGERSTE	80	68	60		
	SOYABOHNE					
	WINTERGERSTE	130	111	98	130	53
	WINTERWEIZEN	145	123	109	145	60
	ZUCKERRÜBE	155	132	116	155	
	ZWIEBEL	170	145	128	170	48
OH	BEGRÜNUNG					
	KÜRBIS	100	85	75	100	70
	MAIS	180	153	135	180	95
	SOMMERGERSTE	130	111	98	130	
	SOYABOHNE					
	WINTERGERSTE					80
	WINTERWEIZEN	170	145	128	170	95

2.3 Nutzung Grünland

2.3.1 Bewirtschaftungsintensität, Flächen und Ertrag

Die Flächen mit intensiver Grünlandnutzung (Kategorie Wiese/-Weide drei und mehr Nutzungen) in den Jahren 2005 – 2017 wurden, wie die Ackerflächen, auf Basis der INVEKOS-Daten ermittelt um die N_2O Emissionen der Grünlandböden in ET, FL, GK und OH zu berechnen.

Im ET liegen die intensiv bewirtschafteten Grünlandflächen vor allem in den Talböden und machen fast ein Drittel der landwirtschaftlichen Fläche aus. Im FL wird mit derselben Kategorie mehr als zwei Drittel der landwirtschaftlichen Fläche abgedeckt. Im GK und OH sind die Grünlandflächen weniger bedeutend. Die biologisch bewirtschafteten Grünlandflächen machen hier sogar weniger als 10% der bewirtschafteten Agrarfläche aus.

2.3.1.1 Ertrag

Gemessene Durchschnittserträge der Jahren 2005 – 2014 der intensiv bewirtschafteten Flächen kamen von Statistik Austria (Tabelle 7). Bei biologischer Bewirtschaftung wurde eine Reduktion von 20% angenommen.

Tabelle 7: Mittlere Erträge (dt TM ha^{-1}) von den intensiv bewirtschafteten Grünlandflächen in den Jahren 2005 – 2014. StAww = Standardabweichung, N = Anzahl Messwerte

Region	Kultur	konventionell Mittelwert [dt TM ha^{-1}]	StAw	N	biologisch von konventionell [%]
ET	drei und mehr Schnitte	74.7	10.0	2	80
FL	drei und mehr Schnitte	91.6	16.4	2	80
GK	drei und mehr Schnitte	83.0	13.7	5	80
OH	drei und mehr Schnitte	73.4	7.0	5	80

Die Zahlen zu den Erträgen wurden nach Ertragslage (hoch und mittel) gegliedert, wobei GK, OH und FL der hohen Ertragslage und ET der mittleren Ertragslage entsprechen. Daten aus Literatur (z.B. AWI Studie), Versuchsberichten (bionet, Fibl, Landwirtschaftliche Fachschulen) und Projekten (Humus, Mubil, NitroAustria/FarmClim) wurden herangezogen. Des Weiteren wurde Rücksprache mit den Beratern (LK, BBK, Bio Austria) gehalten um die Daten zu ergänzen bzw. Datenlücken zu schließen.

2.3.2 Düngung

Die Mengen an regional verfügbaren Wirtschaftsdünger wurden auf Basis von Daten der Statistik Austria eingesetzt bzw. aus den INVEKOS Daten berechnet. Zusätzlich wurden die im Projekt „Tierhaltung und Wirtschaftsdüngermanagement in Österreich“ (Amon *et al*. 2007, Amon *et al*. 2018, Pöllinger *et al*. 2018) erhobenen Daten zu Haltungssystemen ergänzend herangezogen. Aus diesen Tierhaltungsdaten wurden anhand der Angaben in „Richtlinien für die sachgerechte Düngung“

(BMFLUW 2017) die feldfallenden N-Mengen berechnet und auf den Flächen umgerechnet. Bei den biologischen Varianten beschränkte sich die N-Düngermenge auf das Niveau des verfügbaren Wirtschaftsdüngers.

Bei den konventionellen Varianten wurden, je nach Ertragslage, die laut der NAPV, erlaubten höchsten N-Gaben an Dünger angenommen. Wenn die Menge an verfügbarem Wirtschaftsdünger zu gering war, wurden bei den konventionellen Varianten mit mineralischem Dünger ergänzt.

Für die UBB Flächen im Grünland wurden bei der Modellierung die ersten zwei Düngergaben unter konventioneller Bewirtschaftung ausgelassen, sodass die Aktivitäten mit einem Schnitt Mitte/Ende Juni zeitgleich mit dem zweiten Schnitt auf den rein konventionell bewirtschafteten Flächen starteten. Die UBB Flächen im Grünland machen 6% im ET und 5% im FL, GK und OH aus. Die konv_UBB Düngemengen setzen sich im ET aus 94% konv_MAX + 6% UBB Bewirtschaftungspraxis zusammen im FL, GK und OH entsprechend, aber mit 95% konv_MAX und 5% UBB.

Bei biologischer Bewirtschaftung wurde nur der berechnete Wirtschaftsdünger bzw. die daraus sich ergebenden N-Mengen ausgebracht. Anzahl Schnitte und Düngergaben waren wie bei konv_MAX.

In Tabelle 8 sind die Düngemengen (kg ha^{-1}) im Grünland je Bewirtschaftungsvariante gelistet.

Tabelle 8: Durchschnittliche Düngemengen der intensiv bewirtschafteten Grünlandflächen basierend auf NAPV und Tierhaltungesdaten - je nach Region und Bewirtschaftungsvariante

Region	Bewirtschaftung	konv_MAX	konv_UBB [kg N ha^{-1}]	biologisch
ET	GRÜNLAND INTENSIV	160	155	93
FL	GRÜNLAND INTENSIV	200	196	97
GK	GRÜNLAND INTENSIV	200	196	111
OH	GRÜNLAND INTENSIV	200	196	122

2.4 Modellierung

Die Modellierung der N-Emissionen wurde mit dem ökosystemaren, prozessorientierten LandscapeDNDC Modell (Version 1.9.3) durchgeführt. Dieses Modell ist eine Weiterentwicklung von DNDC und ist ausführlich in Haas *et al.* (2013) beschrieben. Das Programm benötigt folgende Eingabeparameter: Tageswerte von Klimadaten (Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit), Bodenparameter (in jedem Bodenhorizont Angaben zu Tiefe, Textur, Lagerungsdichte, Gehalt an C_{org} und Grobskelettgehalt, sowie Angaben zum Wasserhaushalt) (FK und WP), geographische Lage, Landnutzung und Bewirtschaftungsangaben (u.a. Kultur, Anbauzeitraum, Düngemenge und Düngezeiten, Erntezeitraum und Bodenbearbeitungsschritte vor und nach der Kultur). Des Weiteren werden von den vorherrschenden Kulturen Durchschnittswerte, wie Ertrag und Düngung, sowie die Durchschnittswerte der regionalen N-Deposition benötigt. All diese Angaben gibt es in unterschiedlicher räumlicher Auflösung aus verschiedenen Quellen (z.B.: N-

Deposition sowie Klimadaten und Bewirtschaftungsangaben auf regionaler Ebene, Bodenparameter auf Standortebene erhoben).

Die Tabelle 9 gibt einen Überblick der verschiedenen modellierten Bewirtschaftungsmaßnahmen pro Landnutzung in den Regionen.

Tabelle 9: Übersicht der simulierten Bewirtschaftungsvarianten der Regionen

Region	L	konv_MAX	konv_-15%	konv_-25%	konv_UBB	biologisch
ET	A					
	G	x			x	x
FL	A					
	G	x			x	x
GK	A	x	x	x	x	x
	G	x			x	x
MF	A	x	x	x	x	x
	G					
OH	A	x	x	x	x	x
	G	x			x	x

LandscapeDNDC wurde auf Basis von Arbeiten zu Pflanzenwachstum, Bodenatmung, Spurengasemissionen und NO_3-Auswaschung validiert (Kraus *et al*. 2015 und Molina-Herrera *et al*. 2015). Für Österreich wurde das Modell im Rahmen von zwei ACRP-Projekten („FarmClim“ und „NitroAustria“) ausführlich anhand von Ertragsdaten und NO_3-Auswaschungsraten validiert. Eine genaue Beschreibung des Modells und die Validierung kann in Kasper *et al*. (2019) gefunden werden. In dieser aktuellen Studie wurden pflanzenphysiologische Eigenschaften der Kulturen für die biologische Bewirtschaftung, anhand erwarteter Erträge, angepasst. Diese sind in der Tabelle 10 gelistet. Die Anpassung erfolgte mit wenigen pflanzenphysiologischen Parametern, alle weiteren Informationen wurden der LandscapeDNDC-Datenbank entnommen.

Tabelle 10: Pflanzenphysiologische Parameter von Ackerkulturen und Grünland, die bei der Regionalisierung des Modells angepasst wurden

Acker	Grünland
Verhältnis Korn:Stroh:Wurzel	Verhältnis Korn:Stroh:Wurzel
C: N Verhältnis in Stroh und Korn	C: N Verhältnis im Korn (Samen)
Niedrigste Temperatur für das Pflanzenwachstum	Niedrigste Temperatur für das Pflanzenwachstum
Anzahl der Temperaturtage bis zur Reife	Anzahl Temperaturtage bis zur Reife
	Anteil Grobwurzeln
	Blattanteil von Stroh
	Blattfläche in Licht und Schatten
	Michaelis-Menten Konstante für N Aufnahme
	N Mangeldefinition
	Sensitivität der Stomata zu Wasserstress
	Seneszenz-Faktor der Blätter und Wurzeln als Folge von Wasserstress
	Wassernutzungseffizient

2.5 Auswertung

Für die Auswertung wurden die modellierten Jahreswerte (zum Beispiel mittlere Jahrestemperatur, Niederschlagssumme, Summe der N_2O Emissionen, mittlere Bodenwassergehalt etc.) aus den verschiedenen Ergebnistabellen zusammengestellt. Wichtig sind vor allem alle Stickstoffparameter der Bodenchemietabellen, sowie das vom Feld entzogene N im Erntegut. Für die Auswertung ebenfalls sehr bedeutend sind bodenphysikalische und meteorologische Werte der Bodenwasser- und Bodenmikroklimadateien. Die Werte zum biologisch fixierten N sind in den pflanzenphysiologischen Tabellen zu finden.

Im Grünland gibt es für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums eine Simulation der Bewirtschaftungsweise je Bodenart in den jeweiligen Regionen. In den Ackerbauregionen wurden dagegen, bedingt durch die Fruchtfolgen, bis zu 35 Wiederholungen im Zeitraum von 10 Jahren modelliert.

Im ET (Grünland) setzen sich – auf Basis der Vorgaben - die konv_UBB Ergebnisse wie folgt zusammen: 94% konv_MAX Ergebnisse + 6% UBB Ergebnisse im FL, GK und OH aus: 95% konv_MAX Ergebnisse + 5% UBB Ergebnisse.

<u>Das N Budget berechnet sich aus:</u>

N Deposition + N_{bio}-gebunden + N Dünger – N Gasemissionen ($NO + N_20 + N_2 + NH_3$) – N Auswaschung (NO_3^- und NH_4^+) – N-Ertrag (exportiert von der Fläche).

Falls das Budget positiv ausfällt heißt dies, der N_{org} Stock im Boden baut sich auf, falls negativ, wird der N Pool im Boden um diese Menge reduziert.

Der Überschuss („*surplus*“) der Bilanz errechnet sich durch N Input (N Deposition, N_{bio}-gebunden + N Dünger) – N-Ertrag. In der Berechnung mit LandsapeDNDC sind die Stall- und Lagerverluste der N-Düngermengen bei den Eingangsparametern berücksichtigt und die Mengen an N-Überschuss sind Netto-N-Überschüsse.

Weiters wurden die ertragsbasierten N_2O Emissionen aus kg N_2O-N ha^{-1} / kg Ertrag TM ha^{-1} und die NUE aus kg N-Dünger ha^{-1} / kg N-Ertrag ha^{-1} berechnet.

Für die statistische Auswertung wurden ungewichtete Daten verwendet. Bei der Berechnung des N Budgets und der ertragsbasierten N_2O Emissionen wurden gewichtete Ergebnisse, je nach flächenmäßiger Ausbreitung der Bodenart, herangezogen.

Alle Auswertungen und Grafiken sind in R (Version 3.4.4) bzw. teilweise in Excel (Windows 8) ausgeführt worden.

2.5.1 Statistik

Eine Überprüfung der Normalverteilung (Saphiro-Wilk-Test) und der Homogenität (Fleigner-Killen-Test) für die N_2O Emissionen ergibt keine Normalverteilung und keine Homogenität. So wurden für die statistische Auswertung nichtparametrische statistische Methoden wie Kruskal-Wallis-Test und Spearman Korrelationsberechnungen verwendet.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die modellierten N_2O Emissionen sind mit jenen anderer Europäischer Studien vergleichbar (z.B. Kammann *et al.* 1998, Leahy *et al*. 2004, Jungkunst *et al*. 2006, Kim *et al.* 2010, Smith *et al.* 2012 und Jones *et al*. 2017). Die jährlichen N_2O Emissionen unterscheiden sich signifikant zwischen Acker und Grünlandböden. Höhere N_2O Emissionen in kg N_2O-N ha^{-1} von Grünlandböden wurden auch bei Goossens *et al.* (2001), Schaufler *et al.* (2010), Molina-Herrera *et al.* (2016) und Schroeck *et al.* (2019) gefunden. Wie in den Abbildungen 5 und 12 zu sehen ist, emittieren die intensiv bewirtschafteten Grünlandböden in allen Bewirtschaftungsvarianten generell mehr N_2O als Ackerböden. Andererseits findet man bei Ackerböden einzelne Jahre und Kulturen, die wesentlich mehr N_2O emittierten (Abbildung 6 und Abbildung 7). Auch der hohe Einfluss von Düngemittel ist nicht neu (Van Groenigen *et al.* 2010, Fuß *et al.* 2011, Butterbach-Bahl *et al*. 2013 und Kim *et al*. 2015) aber eine präzise Berechnung dieser Einflussgröße (also wieviel N_2O durch die Ausbringung der Düngemittel während der Bewirtschaftung in den verschiedenen Anbaugebieten und unter lokalen Gegebenheiten verursacht wird) wurde noch nicht auf österreichische Verhältnisse angepasst. Nachfolgend werden N_2O Emissionen und N-Budgets der Acker- und Grünlandböden getrennt behandelt.

3.1 Ackerböden

3.1.1 N_2O Emissionen

3.1.1.1 Regionale Unterschiede

Die drei gewählten Ackerbauregionen zeigen unterschiedliche Mengen an emittierten Lachgasemissionen (Tabelle 10). Im Mittel der Jahre werden die geringsten die geringsten Mengen an Lachgas im OH emittiert (0.4 bis 0.8 kg N_2O-N ha^{-1}), gefolgt von MF (0.7 bis 1.2 kg N_2O-N ha^{-1}) und GK (0.6 bis 1.6 kg N_2O-N ha^{-1}). Diese Variationsbreiten sind mit gemessenen N_2O Emissionen von Ackerböden in Europa (Jungkunst *et al*. 2006) vergleichbar. Die Produktionsgebiete können jedoch nicht direkt bzw. nur begrenzt miteinander verglichen werden, denn es ist zu berücksichtigen, dass die Gebiete unterschiedlichen Ertragslagen zugeordnet werden. GK und OH werden der hohen Ertragslage zugeordnet und erhalten hohe Stickstoffmengen durch die Düngung. Allerdings kann man auch hier keinen direkten Vergleich anstellen, da zum Teil unterschiedliche Kulturen angebaut werden und somit auch andere Bearbeitungsschritte gesetzt werden.

3.1.1.2 Einfluss der Bewirtschaftung

Die höchsten jährlichen N_2O Emissionen sind im MF unter intensiver konventioneller Bewirtschaftung (konv _MAX) zu finden. Die jährliche N_2O Emissionen reichen von 0.07 bis 12.5 kg N_2O-N ha^{-1}. Im OH reicht diese Spannweite von 0.08 bis 8.2 kg N_2O-N ha^{-1}, in GK sogar nur von 0.1 bis 7.9 kg N_2O-N ha^{-1} (Tabelle 11). Die Spannweiten ergeben sich aus hohen Einzelwerten verursacht durch die Bewirtschaftung (Höhe der Düngergaben) in Kombination mit klimatischen Verhältnissen und standortspezifischen Eigenschaften. Für kulturspezifische Spannweiten sind in Tabelle 1/Annex die mittleren, minimalen und maximalen jährliche N_2O Emissionen der verschiedenen Kulturen in dieser Studie gelistet. In Hinblick auf den IPCC-Emissionsfaktor, der sich laut dem Tier 1-Verfahren aus 1,0% N_2O-N pro ausgebrachtem Kilogramm Dünger-N ergibt, kann zwar kein direkter Vergleich angestellt werden (Grund ist eine andere Berechnungsmethode in LandscapeDNDC), so liegen die berechneten Ergebnisse (Mittelwerte von Tabelle 11: 0.4 bis 1.6 kg N_2O-N ha^{-1}) aber eher unter diesem Faktor.

Tabelle 11: Simulierte mittlere, niedrigste (Minimum) und höchste (Maximum) jährliche N_2O Emissionen (kg N_2O-N ha^{-1}) aller Bewirtschaftungsvarianten in den drei Regionen Grieskirchen (GK), Marchfeld (MF) und Oststeirisches Hügelland (OH) aus den Jahren 2005 – 2014.

Region	Bewirtschaftung	Ackerböden [kg N_2O-N ha^{-1}]		
		Mittelwert	Minimum	Maximum
(GK)	konv_MAX	1.6	0.10 -	6.3
	konv_-15%	1.1	0.10 -	4.7
	konv_-25%	0.8	0.10 -	4.0
	konv_UBB	1.4	0.14 -	7.9
	biologisch	0.6	0.14 -	5.2
(MF)	Konv_MAX	1.2	0.07 -	12.5
	Konv_-15%	0.9	0.07 -	6.2
	Konv_-25%	0.7	0.07 -	4.4
	Konv_UBB	1.0	0.09 -	12.2
	biologisch	0.7	0.08 -	7.7
(OH)	Konv_MAX	0.8	0.09 -	8.2
	Konv_-15%	0.7	0.09 -	6.8
	Konv_-25%	0.6	0.09 -	5.1
	Konv_UBB	0.7	0.08 -	8.0
	biologisch	0.4	0.10 -	1.2

In allen Regionen übt die Art der Bewirtschaftung, vor allem die ausgebrachten Mengen an N Dünger, einen großen Einfluss auf die Menge der N_2O Emissionen aus (Abbildung 5). Die N_2O Emissionen der Bewirtschaftungsvarianten unterscheiden sich im GK und MF signifikant in der Reihe: konv_MAX > konv_UBB > konv_-15% > konv_-25% > biologische Bewirtschaftung (Abbildung 5; kleine Buchstaben). Diese Einstufung zeigt wie erwartet den Einfluss der Maßnahmen. Im OH ist es ähnlich nur unterscheiden sich die N_2O Emissionen von konv_MAX und konv_UBB nicht signifikant.

Die Emissionen variieren zwischen den Jahren zum Teil sehr stark. Anzahl und Ausmaß der Jahre mit überdurchschnittlich hohen N_2O Emissionen kommen v.a. im MF vor. Da sich die Bewirtschaftungssysteme v.a. durch die Menge an N-Dünger aber auch durch die an der Fruchtfolgezusammensetzung und den Anteil an Leguminosen in der Fruchtfolge unterscheiden, ist es naheliegen, dass diese Faktoren entscheidend für die freigesetzten Mengen an N_2O sind.

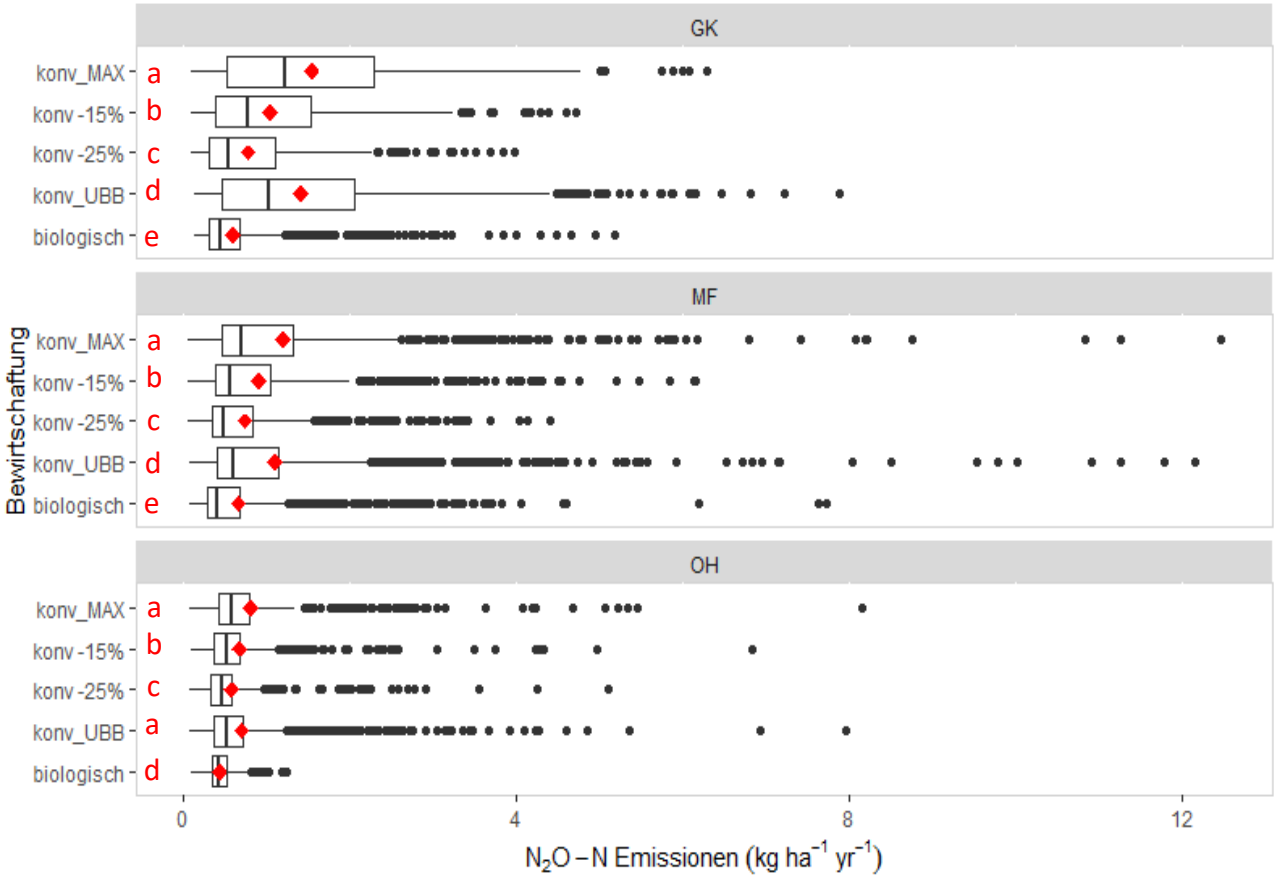


Abbildung 5: N_2O Emissionen der modellierten Ackerbauregionen bei unterschiedlicher Bewirtschaftung (konv_MAX = konventionelle Bewirtschaftung mit maximal erlaubten Mineraldüngemengen; konv -25% = konventionelle Bewirtschaftung mit um 25% reduziertem Mineraldüngereinsatz; konv -15% = konventionelle Bewirtschaftung mit 15% reduziertem Mineraldüngereinsatz; konv_UBB = konventionelle Bewirtschaftung nach UBB Bestimmung; biologisch = biologische Bewirtschaftung). Kleine Buchstaben = signifikante Unterschiede ($p<0.05$) zwischen den Bewirtschaftungsvarianten in einer Region. . ◆ = Mittelwert; Punkte = Ausreißer.

Im GK (n=5500) korrelieren die jährlichen N_2O Emissionen unabhängig von Bewirtschaftungsvariante („alle V“) am stärksten mit der Düngemenge (r_s = 0.43), dem Gehalt an organischem Stickstoff im Boden (Boden N_{org}) (r_s = 042) und dem N-Überschuss (r_s = 0.39); Zudem mit den Parametern mittlere jährliche Lufttemperatur (r_s = 0.12) und dem mittleren Gehalt an Bodenwasser (r_s =0.09; alle $p<0.001$) (Tabelle 12; alle V). Das bedeutet, dass die N_2O Emissionen höher sind, wenn mehr gedüngt wird und bei Böden mit höherem Stickstoffgehalt, besonders in wärmeren Jahren mit höheren Bodenwassergehalten bzw. mit darauffolgend höheren Niederschlagsmengen. Vor allem der Bodenwassergehalt ist bei biologischer Wirtschaftsweise im GK von höherer Bedeutung (r_s = 0.15),

während die Lufttemperatur keine Rolle spielt. Bei biologischer Wirtschaftsweise werden die N_2O Emissionen stärker als bei konventioneller Bewirtschaftung vom Boden N_{org} und durch die Düngemengen bestimmt. Diese Parameter sind bei konv_-15% und konv_-25% weniger wichtig. Die N_2O Emissionen von den reduzierten Düngervarianten im GK werden am stärksten vom N-Überschuss beeinflusst. Die Korrelationen bei konv_UBB unterscheiden sich nur wenig von konv_MAX, bei denen die Emissionen v.a. bei düngerintensiven Ackerkulturen in wärmeren Jahren hohe N_2O Emissionen erreicht werden.

Im MF (n=6720) beeinflusst vor allem der Wassergehalt im Boden (r_s = 0.48, p<0.001) gemeinsam mit dem Boden N_{org} (r_s = 0.57, p<0.001) die N_2O Emissionen. Grund dafür sind ungünstige Bedingungen für den mikrobiellen Abbau (Denitrifikation). Bei der biologische Wirtschaftsweise ist ein hoher Boden N_{org} Gehalt (r_s = 0.69, p<0.001) für die Menge an N_2O ausschlaggebend. Nur hier spielen auch klimatische Bedingungen wie Jahresniederschlag (r_s = 0.19) und mittlere Jahres-Lufttemperatur (r_s = 0.14, beide p<0.001) eine Rolle. Hohe N_2O Emissionen bei den konventionellen Bewirtschaftungsvarianten im MF kommen v.a. bei höheren Bodenwassergehalten und N-Düngemengen auf Böden mit hohem N_{org} Gehalt vor. Das bedeutet, dass in der Trockenregion MF die Wasserverfügbarkeit und der Gehalt an organischem Boden N nicht nur für die Pflanzenproduktion aber auch für die N_2O Emissionen ausschlaggebend sind. Bzw. wird in Jahren mit höheren Bodentemperaturen (r_s= -0.13 p<0.001; nicht in der Tabelle) und wenig Wasser weniger N_2O emittiert. Die negative Korrelation zwischen N_2O Emissionen und N-Überschuss im MF bedeutet, dass in Jahren mit hohem N Überschuss, bzw. geringem Pflanzenwachstum (geringe N-Aufnahme in den Pflanzen) die N_2O Emissionen auch gering ausfallen. Also ist in diesen Jahren nicht nur der Pflanzenwuchs, sondern auch die mikrobielle Aktivität gehemmt.

Wie im GK, so sind auch im OH (n=3390) die N_2O Emissionen höher in Jahren mit höheren Lufttemperaturen (r_s = 0.29) und Niederschlagssummen (r_s= 0.32). Zudem sind auch die jährlichen Düngemengen wichtig (r_s= 0.49; alle p<0.001). Die Düngung und der Gehalt an Boden N_{org} haben bei der biologischen Variante den höchsten Einfluss bzw. die größte Korrelation (r_s = 0.62 bzw. 0.43; beide p<0.001). Bei den konventionellen Varianten wirkt der N-Überschuss positiv auf die N_2O Emissionen und nur hier sind die N_2O Emissionen von Niederschlag und Lufttemperatur stark beeinflusst.

Sobald die Düngemengen reduziert werden, schwindet der Einfluss der Düngung und andere Faktoren werden zusehends wichtiger/dominanter. Skinner *et al.* (2014) stellen in ihrer Metastudie fest, dass N_2O Emissionen von biologisch bewirtschafteten Flächen viel stärker von Standort- und Bodenverhältnissen beeinflusst werden als rein von den N-Düngemengen wie es bei den intensiveren, konventionell betriebenen Ackerflächen der Fall ist.

Tabelle 12: Korrelationen zwischen kg N_2O-N ha^{-1} yr^{-1} und verschiedene Standort- und Bewirtschaftungs-parameter in den drei Regionen mit deren Signifikanzen (n.s. = nicht signifikant, * = p<0.05, ** p<0.01, *** = p<0.001)

Region	Bewirtschaftung	Lufttemperatur (°C)		JahresNS (mm)		Bodenwasser (%) 10 cm Tiefe		Boden N_{org} (kg ha^{-1})		N-Düngung (kg ha^{-1})		N-Überschuss	
GK	alle V*	0.12	***	-0.01	n.s.	0.09	***	0.42	***	0.43	***	0.39	***
	konv_MAX	0.22	***	-0.04	n.s.	0.10	**	0.20	***	0.47	***	0.45	***
	konv_-15%	0.18	***	-0.02	n.s.	0.08	*	0.23	***	0.15	***	0.40	***
	konv_-25%	0.15	***	0.00	n.s.	0.05	n.s.	0.22	***	0.09	***	0.36	***
	konv_UBB	0.17	***	-0.03	n.s.	0.07	**	0.36	***	0.49	***	0.48	***
	biologisch	-0.02	n.s.	0.01	n.s.	0.15	***	0.59	***	0.57	***	0.39	***
MF	alle V*	0.06	***	0.08	***	0.48	***	0.57	***	0.37	***	0.05	***
	konv_MAX	0.00	n.s.	0.04	n.s.	0.51	***	0.51	***	0.32	***	-0.11	***
	konv_-15%	0.00	n.s.	0.04	n.s.	0.51	***	0.51	***	0.32	***	-0.11	***
	konv_-25%	0.02	n.s.	0.04	n.s.	0.51	***	0.54	***	0.30	***	-0.13	***
	konv_UBB	0.04	n.s.	0.05	n.s.	0.51	***	0.56	***	0.29	***	-0.13	***
	biologisch	0.14	***	0.19	***	0.52	***	0.69	***	0.18	***	-0.36	***
OH	alle V*	0.29	***	0.32	***	-0.05	n.s.	0.36	***	0.49	***	0.66	***
	konv_MAX	0.36	***	0.39	***	0.01	n.s.	0.25	***	0.40	***	0.66	***
	konv_-15%	0.36	***	0.39	***	0.02	n.s.	0.27	***	0.40	***	0.67	***
	konv_-25%	0.38	***	0.41	***	0.04	n.s.	0.28	***	0.39	***	0.57	***
	konv_UBB	0.34	***	0.34	***	-0.09	*	0.35	***	0.39	***	0.69	***
	biologisch	0.16	***	0.25	***	0.04	n.s.	0.43	***	0.62	***	0.51	***

*Alle V= Region zusammengefasst mit allen modellierten Bewirtschaftungsvarianten

3.1.1.3 Rolle der Bodenart

In den drei Regionen spielt vor allem im GK und im MF die Bodenart eine Rolle bezogen auf die jährlichen N_2O Emissionen. In Abbildung 6 sind diese Emissionen über alle Jahre und Fruchtfolgen der regionalen Bodenarten zu sehen. Im MF emittiert der lehmig, schluffige Boden am meisten und jener mit dem höchsten Sandgehalt am wenigsten N_2O im Jahr (Abbildung 6). Alle Unterschiede sind signifikant (p<0.001). In GK emittiert der Schluffboden am wenigsten N_2O, wo hingegen die anderen gleich viel N_2O emittieren. Signifikanzen konnten nur bei den Bewirtschaftungsvarianten konv_-25% und bei biologischer Bewirtschaftung gefunden werden. Im OH emittiert der lehmige Sandboden der konventionellen Bewirtschaftungsvarianten die höchsten N_2O Ausgasungen. Bei der biologischen Variante gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bodenarten.

Grundsätzlich sieht man größere Unterschiede zwischen den Bewirtschaftungsvarianten (Abbildung 6) als zwischen den Bodenarten. Wie Skinner *et al.* (2014) stellten auch Goossens *et al.* (2001) fest,

dass bei intensiv bewirtschafteten Flächen in Belgien die Düngemengen einen viel größeren Einfluss auf die N_2O Emissionen haben als die Bodenart.

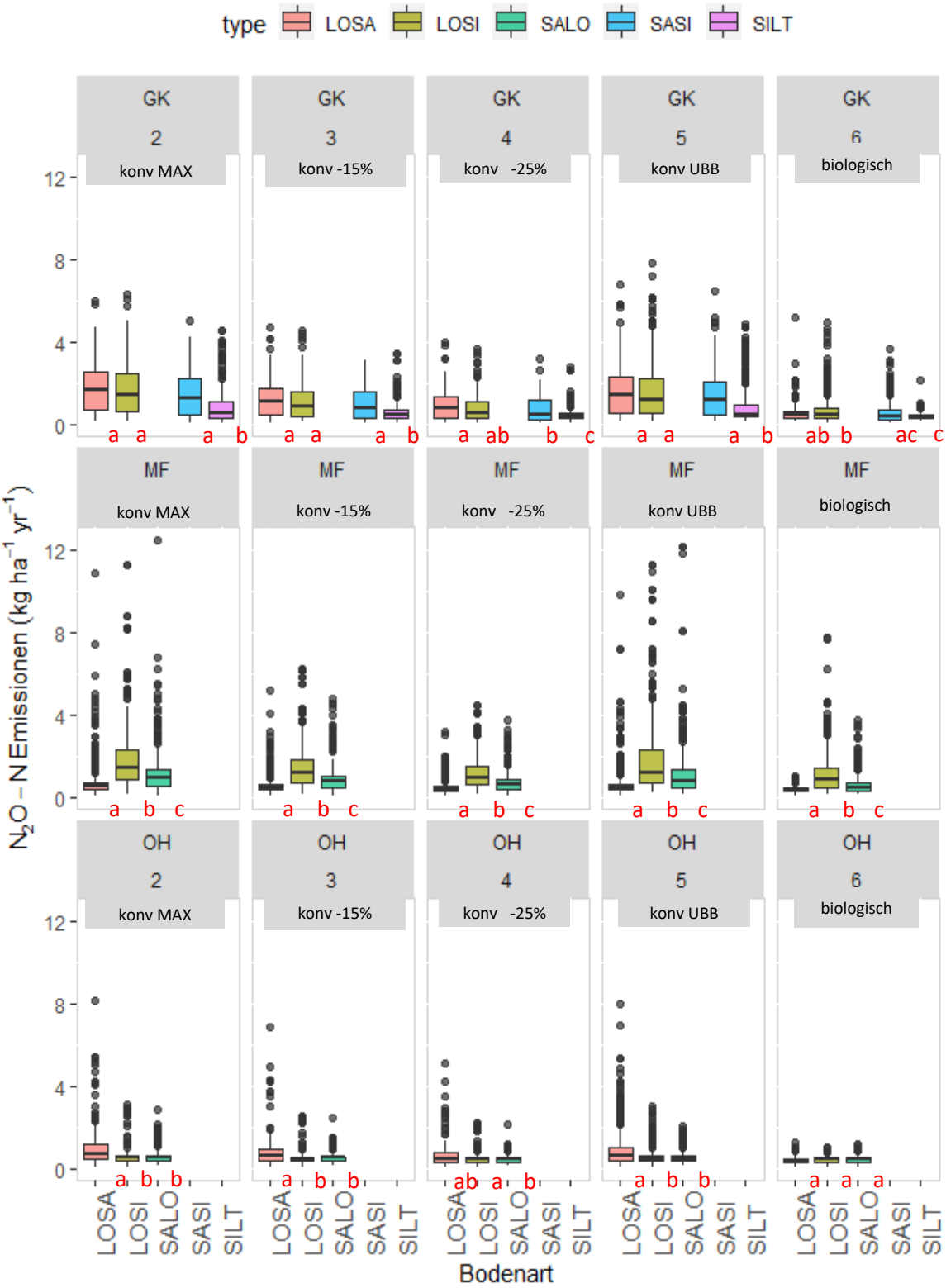


Abbildung 6: Jährliche N_2O Emissionen nach Bodenart (LOSA = lehmiger Sand; LOSI = lehmiger Schluff, SALO = sandiger Lehm, SASI = sandiger Schluff, SILT = Schluffboden) in den drei Regionen Grieskirchen (GK), Marchfeld (MF) und Oststeirisches Hügelland (OH) für die Simulationsperiode 2005 – 2014.

3.1.1.4 Rolle der Kultur

Betrachtet man die drei Ackerbauregionen insgesamt (über alle Jahre und alle Bodenarten), so entweicht im Mittel das meiste N_2O beim Anbau von Gemüse im MF (Abbildung 7; Tabelle im Anhang A2). Generell sind die Emissionsraten bei allen betrachteten Kulturen niedriger je weniger gedüngt wird (konv_-15% > konv_-25% > biologisch). Die niedrigsten Jahressummen an N_2O-Emissionen werden in allen Regionen beim Sojaanbau emittiert.

Im MF erfolgen die höchsten Jahressummen (N_2O-Ausreißer) bei konv_MAX und konv_UBB bei den teils bewässerten Kulturen: Gemüse, Mais und Zuckerrüben (Abbildung 5). Diese Kulturen erhalten auch gemeinsam mit Wintergetreide die höchsten Düngergaben. Die Ausreißer kommen fast ausschließlich auf dem humusreicheren, lehmig schluffigen Boden (LOSI) folgender Kulturen vor: Gemüse v.a. in den Jahren 2008 und 2013, bei Zuckerrübe in 2014 und bei Mais eher in 2005 (Daten nicht gezeigt). Gemüse und Zuckerrübe sind beide Hackkulturen mit einer langsamen Jugendentwicklung. Beim zeitigen Anbau im Frühjahr wird gleich ein großer Teil der Düngemenge ausgebracht. Bei steigenden Luft- und Bodentemperaturen in Mai und Juni, kombiniert mit einem Überschuss an verfügbarem Stickstoff, kommt es zu hohen N_2O Emissionen durch die Aktivität der Mikroorganismen im Boden. Einen entscheidenden Einfluss von steigenden Temperaturen bei gleichzeitigem N Überschuss auf die N_2O Emissionen haben auch Schindlbacher *et al.* (2004), Van Groeningen *et al.* (2010) und Zhang & Niu (2016) gefunden.

Der Anbau von Wintergetreide und Mais führt zu den höchsten N_2O Emissionen im GK. Bei den Wintergetreiden kommen die höchsten Jahressummen vor, wenn beispielsweise das Wintergetreide direkt nach den Leguminosen angebaut wird. In konv_UBB und biologischer Bewirtschaftung kommen die meisten Ausreißer bei den Winterungen von Gerste und Weizen vor. Das bedeutet, dass hier Klima und Vorfruchtwirkung in einzelnen Jahren den höheren Einfluss hat (Abbildung 5).

Im OH kommen alle N_2O Ausreißer im Jahr 2014 beim Anbau von Mais und Kürbis vor. 2014 war das wärmste und feuchteste Jahr in der Untersuchungsperiode (Abbildung 3). Hier wie im MF waren die Bedingungen mit relativ hohen Niederschlagsmengen und hohen Temperaturen in Mai und Juni besonders günstig für N_2O Emissionen.

Vergleicht man die N_2O Emissionen aller Jahre, Böden und Produktionsgebiete, bestätigt sich auch hier generell die Tendenz, dass die betrachteten Reduktionsmaßnahmen wie der Anbau von Biodiversitätsflächen (konv_UBB), die Reduktion von N-Dünger zu 15% (konv_-15%) und 25% (konv_-25%) die N_2O Emissionen verringern.

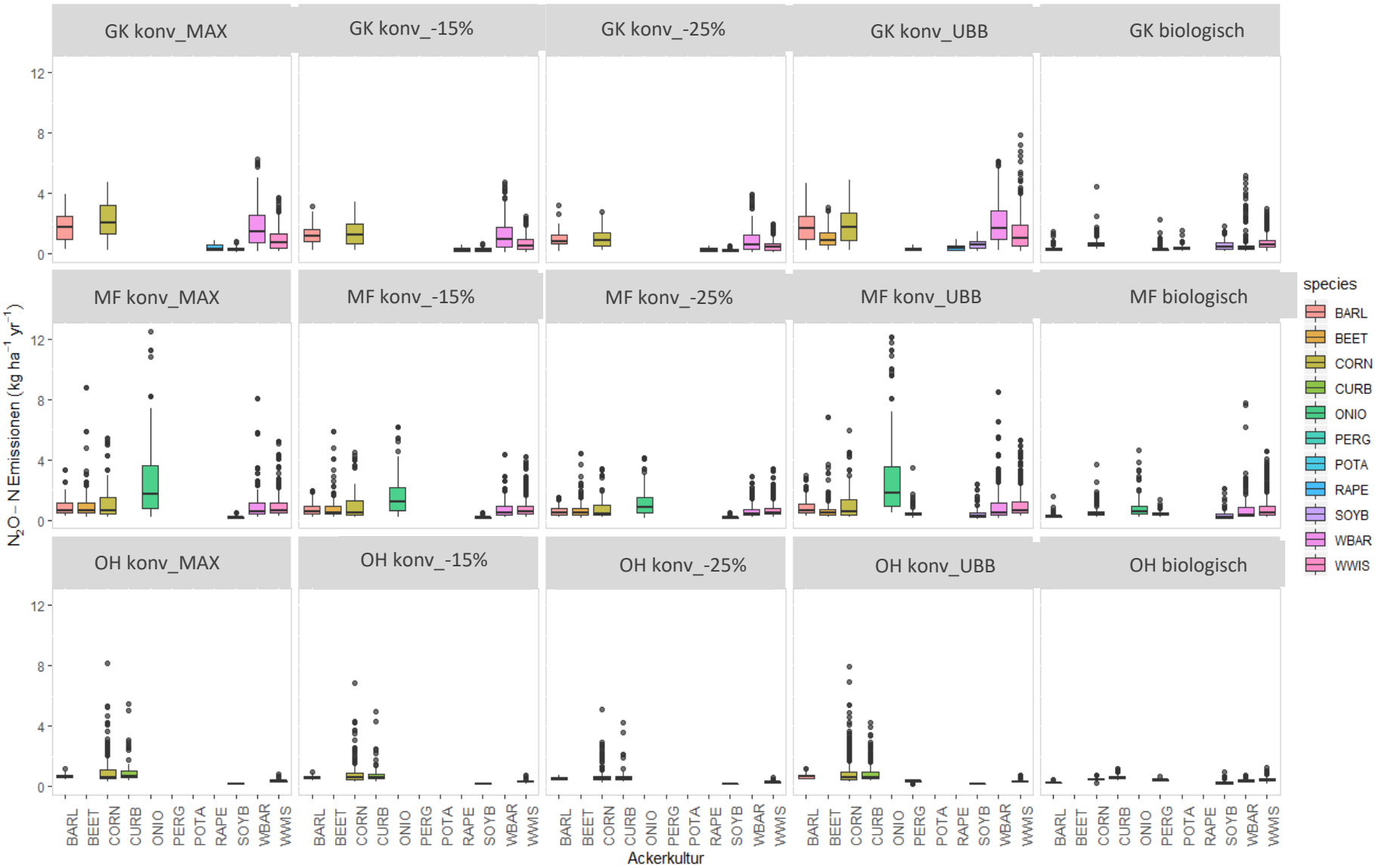


Abbildung 7: Jährliche N_2O Emissionen (kg N_2O-N ha^{-1}) der einzelne Ackerkulturen in den drei Regionen Grieskirchen (GK), Marchfeld (MF) und Oststeirisches Hügelland (OH)

Abbildung 8 stellt das Reduktionspotential der Bewirtschaftungsmaßnamen in Bezug auf die mittleren N_2O Emissionen (kg N_2O-N ha^{-1} yr^{-1}) quer über die drei simulierten Ackerregionen dar. Im Vergleich zu konv_MAX verringern sich die N_2O Emissionen bei fast alle Kulturen bei reduzierten Düngemengen und bei der biologischen Bewirtschaftung um 28 – 71%. Bei manchen Kulturen (Sommer– und Wintergetreide und Gemüse) sind die jährlichen Emissionen 3 – 15% höher bei konv_UBB als bei konv_MAX. Bei der Sojaproduktion (SOYB) betragen die Reduktionen bei konv_-15% und konv_-25% nur 7 – 13% währen bei konv_UBB und biologisch über 70% mehr N_2O jährlich emittiert wird. Es sind nur Kulturen, die auch bei der konv_MAX modelliert werden, abgebildet. Interessant sind v.a. die Kulturen Mais (CORN), Wintergerste (WBAR) und Gemüse (ONIO) wo relativ hohe Reduktionen der N_2O Emissionen bei nur einer geringen Minderung der Düngemengen in den Bewirtschaftungsvarianten konv_-15% und konv_-25% errechnet wurden.

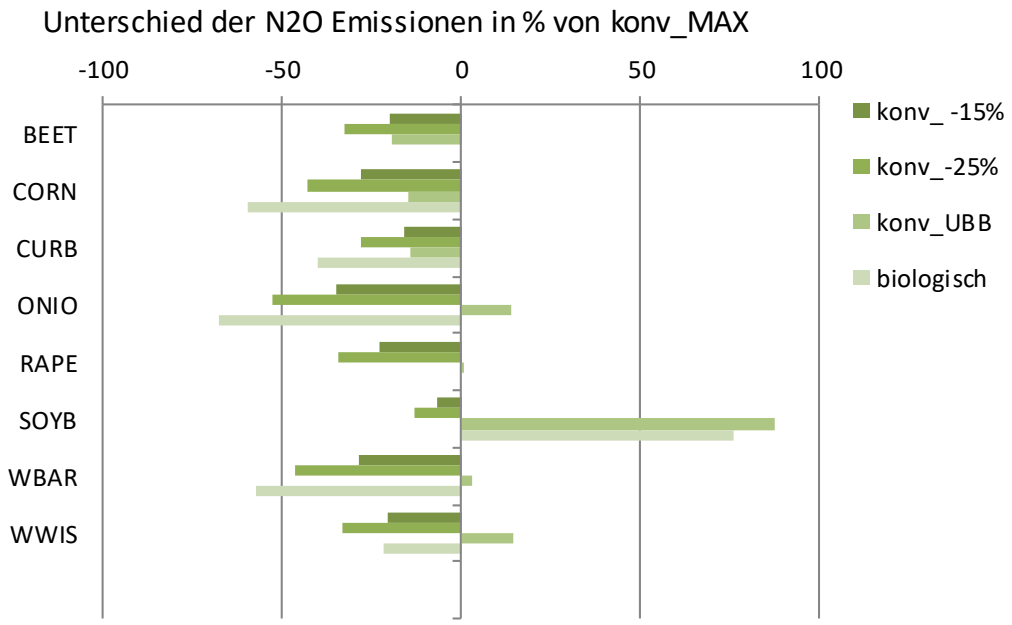


Abbildung 8: Unterschied der N_2O Emissionen aller Reduktionsmaßnahmen (konv_-15%; konv_-25%; konv_UBB; biologisch) im Vergleich zum höchstzulässigen Düngungsniveau (konv_MAX). BARL = Sommergetreide, BEET = Zuckerrübe, CORN = Mais, CURB = Ölkürbis, ONIO = Gemüse, RAPE = Winterraps, SOYB = Sojabohne, WBAR und WWIS = Wintergetreide

3.1.2 Erträge

Bezogen auf die generierten Inputdaten wurden für die ausgewählten Kulturen in den betrachteten Regionen die mittleren Erträge für die einzelnen Bewirtschaftungsvarianten berechnet (Tabelle 13). Es ist hierbei zu berücksichtigen, dass im Modellierungsprogramm die oberirdische Biomasse aller Kulturen mit einem C-Gehalt von 45% berechnet wurde. Aus dem C-Ertrag errechnet sich die Trockenmasse (TM).

Wir sehen wie die Erträge bei den meisten Kulturen in der Reihenfolge konv_MAX > konv_UBB > konv_-15% > konv_-25% > biologisch abnehmen. Nur bei der Sojabohne und bei der Begrünung gibt es keinen nennenswert Ertragsunterschied zwischen den Varianten.

Tabelle 13: Modellierte mittlere Erträge der verschiedenen Ackerkulturen ja nach Bewirtschaftung

Region	Kultur	konv_MAX [dt TM ha^{-1}]	konv_-15% [dt TM ha^{-1}]	konv_-25% [dt TM ha^{-1}]	konv_UBB [dt TM ha^{-1}]	biologisch [dt TM ha^{-1}]
	BEGRÜNUNG				38.3	40.1
	ERDÄPFEL					31.2
	MAIS	91.6	87	81.2	91.1	55.1
	RAPS	45	40.3	36.7	45.6	
GK	SOMMERGERSTE	51.6	47.3	44	53.5	24.7
	SOYABOHNE	24.7	24.7	24.6	25.3	25.5
	WINTERGERSTE	78.5	73.4	68.3	79	34.8
	WINTERWEIZEN	70.6	65.3	60.6	70.3	35.4
	ZUCKERRÜBE				171.3	
	BEGRÜNUNG				24.1	26.6
	MAIS	108.7	95.9	87.2	105.6	71.8
	SOMMERGERSTE	41.6	41.1	40.5	42.3	25.3
MF	SOYABOHNE	24	23.9	23.8	23.7	23.3
	WINTERGERSTE	58.8	55.2	52.4	58.9	35.5
	WINTERWEIZEN	40.7	40.3	39.7	40.6	31.1
	ZUCKERRÜBE	190.5	176	163.5	182	
	ZWIEBEL	38.1	36.2	34.4	38.7	30.8
	BEGRÜNUNG				36.1	35.9
	KÜRBIS	5.3	5.3	5.3	5.3	4.3
	MAIS	97.8	96.7	94.4	97.8	60.5
OH	SOMMERGERSTE	52.9	51.7	50.2	52.9	29.6
	SOYABOHNE	24.7	24.6	24.6	24.5	24.7
	WINTERGERSTE					35.1
	WINTERWEIZEN	62.4		55.6	62.6	31.8

Individuelle Kulturbedürfnisse, die sich sowohl auf die N-Bilanz als auch auf die Ertragsmengen auswirken, wurden bei der Modellierung berücksichtigt, wie z.B. der hohe Wasserbedarf von Winterweizen im Mai und Juni, der sich auf den Ertrag auswirkt. Die Wirkung der ZF und Leguminosen wird ebenfalls in LandscapeDNDC in die Berechnungen miteinbezogen. Simulierte Erträge der ZF werden in der Tabelle 13 nicht angeführt. In dieser Studie geht man davon aus, dass die ZF nicht abgeführt werden, die oberirdische Biomasse auf dem Feld verbleibt und bei der ersten Bodenbearbeitung eingearbeitet wird. Organisch gebundenes C und N der Zwischenfrüchte fließen also direkt in das System Boden wieder ein.

In Abbildung 9 sehen wir die Unterschiede der mittleren jährlichen N_2O Emissionen und die Erträge (über alle Jahre und Kulturen), beide in %, zwischen konv_MAX und den unterschiedlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen. Bei den N_2O Emissionen reichen die Reduktionen von -9% bei GK konv_UBB bis -71% im OH biologisch, während die Erträge zwischen -2% bei GK konv_UBB bis -55% im OH biologisch zurückgehen. Durchgehend werden die N_2O Emissionen prozentuell mehr reduziert als die Erträge. Auch Fuß *et al.* (2011) fand in einer deutschen Langzeitstudie, dass die Denitrifikationsprozesse stärker von N-Dünger beeinflusst werden als Pflanzenwachstum und Ertrag. Bei konv_-15% und konv_-25% ist die Fruchtfolge mit konv_MAX ident und die Reduktionen folgen ausschließlich den reduzierten Düngemengen. In konv_UBB werden die einzelnen Kulturen gleich viel gedüngt wie in konv_MAX, somit beruht die Reduktionen der N_2O Emissionen auf der Kulturzusammensetzung, bzw. jener der nichtgedüngten Kulturen (Soja, Begrünung) in der Fruchtfolge. Bei biologischer Bewirtschaftung unterscheidet sich sowohl Düngemenge als auch Fruchtfolgegestaltung von der konv_MAX Variante.

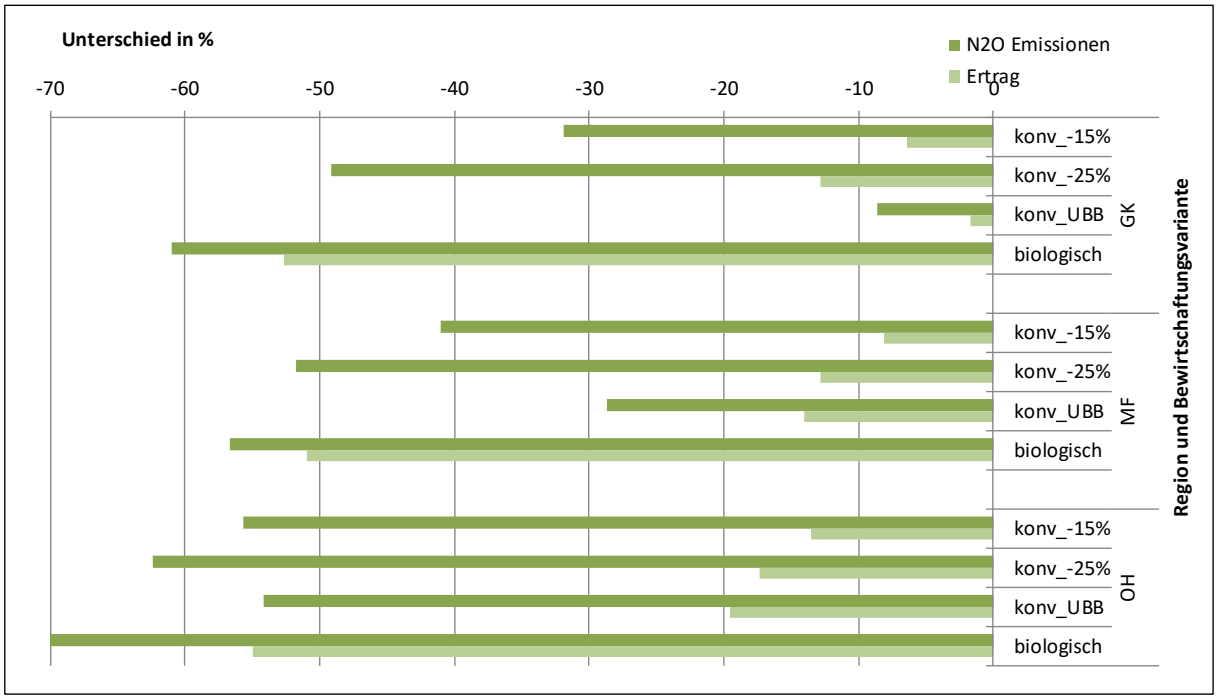


Abbildung 9: Unterschiede in % von mittleren jährlichen N_2O Emissionen und Ertrag zwischen den Bewirtschaftungsmaßnahmen konv_-15%, konv_-25%, konv_UBB und biologisch im Vergleich zu konv_MAX.

Vergleicht man die Erträge aller Jahre, Böden und Produktionsgebiete, so ist der Ertrag vor allem unter biologischer Bewirtschaftung niedriger (Abbildung 10). Besonders Wintergetreide, Sommergetreide und Mais liegen bei biologischer Bewirtschaftung mit -36 bis -49% weit hinter den Ertragserwartungen unter konventioneller Bewirtschaftung mit maximalen N-Düngergaben. Die Ergebnisse liegen in der gleichen Größenordnung wie bei den gemessenen Daten (de Ponti *et al*. 2012). Zwar sind die Mittleren Erträge in dem Review von de Ponti höher, doch Seufert *et al.* (2012)

zeigten, dass Ertragsunterschiede beim Vergleich konventioneller und biologische Bewirtschaftung in sehr intensiven Bewirtschaftungssystemen größer waren, als in Regionen mit niedrigerem Düngereinsatz. So sind auch in dieser Studie die relativen Unterschiede im MF geringer als die in den Hochertragslagen GK und OH. Bei Gemüse (hier: Zwiebel) und Kürbis sind die Reduktionen zwischen den mittleren Erträgen bei konv_MAX und biologische Bewirtschaftung nur bis -20%. Das entspricht dem durchschnittlichen Unterschied für Gemüse bei der Studie von de Ponti (2012), allerdings reichen die Vergleichszahlen von –80% bis +140% bei den relativen Erträgen und so gesehen schneiden die Gemüsekulturen bei der Modellierung der biologischen Fruchtfolgen gut ab.

Wir sehen in der Abbildung auch, dass sich die Maßnahme UBB bei einigen Kulturen positiv auf die Ertragsmengen auswirkt. Besonders das Sommergetreide profitiert hier von der erweiterten Fruchtfolge.

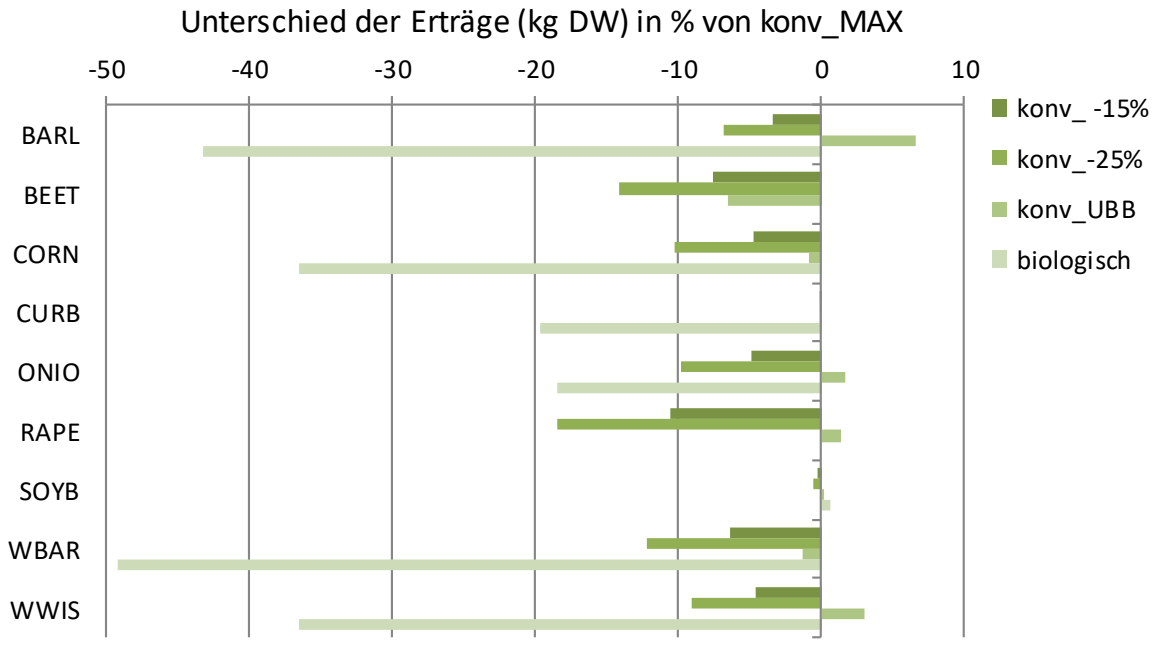


Abbildung 10: Vergleich der N_2O Emissionen und Ertrag der Kulturen bei konv_-15%, konv_-25%, konv_UBB und biologischer Bewirtschaftung aller Regionen, Jahre und Böden in % von den konv_MAX Ergebnissen (es wurden nur Kulturen, die bei konv_MAX angebaut werden, berücksichtigt). BARL = Sommergetreide, BEET = Zuckerrübe, CORN = Mais, CURB = Ölkürbis, ONIO = Gemüse, RAPE = Winterraps, SOYB = Sojabohne, WBAR und WWIS = Wintergetreide

3.1.3 Stickstoffflüsse, Nutzungseffizienz und N-Überschuss

Die N_2O Emissionen hängen von verfügbarem N (und C_{org}) und von der Dynamik der anderen N-Flüsse ab. In diesem Teil werden die N-Budgets und N-Bilanzen beschrieben. N-Flächenvergleich aber auch der Vergleich der NUE verschiedener Systeme eignen sich gut um mehrere Aspekte der Bewirtschaftungsmaßnahmen abzubilden und sollte in eine Evaluierung einfließen.

Das N-Budget ergibt sich aus den Einträgen (N-Deposition, N_{bio}-gebunden, N-Düngung) abzüglich der Austräge (N-Emissionen, N-Auswaschung, N-Ertrag) im System. Tabelle 14 zeigt die nach der Ausdehnung der unterschiedlichen Bodenarten gewichteten N-Budgets der Ackerflächen aller Bewirtschaftungsvarianten in allen Regionen für den betrachteten Zeitraum (2005-2014). Bis auf die biologische Bewirtschaftung in MF (-3 kg N ha^{-1} yr^{-1}) und konv -25% (0 kg N ha^{-1} yr^{-1}) zeigen alle N-Budgets, dass pro Jahr Stickstoff in das System Boden eingespeist wird. Derer N liegt im Boden organisch gebunden vor. Die positiven Budgets bestätigen die Ergebnisse einer AGES-Studie, dass die Humusgehalte in den österreichischen Ackerböden zunehmen (BMNT 2015).

Der meiste Stickstoff wird dem Boden mittels Dünger zugeführt (44 bis 157 kg N ha^{-1} yr^{-1}), der größte Austrag erfolgt mit der Ernte (44 bis 84 kg N ha^{-1} yr^{-1}). Die Rücklagen reichen im 10-jährigen Schnitt von 1 bis 15 kg N ha^{-1} yr^{-1} und sind bei konv_MAX im GK mit 15 kg N ha^{-1} yr^{-1} am höchsten. Im MF sind die Budgets nahezu ausgeglichen (-3 bis 3 kg N ha^{-1} yr^{-1}). Im OH reichen die Werte von 6 bis 13 kg N ha^{-1} yr^{-1} wobei das Ergebnis in konv_-15% sogar etwas höher ist (13 kg N ha^{-1} yr^{-1}) als jenes von konv_MAX (12 kg N ha-1 yr^{-1}).

Tabelle 14: Modellierte, gewichtete Mittelwerte der N-Flüsse und des N-Budgets in kg N ha^{-1} yr^{-1} aller Bewirtschaftungsvarianten in den drei Ackerregionen Grieskirchen (GK), Marchfeld (MF) und Oststeirisches Hügelland (OH).

Region	Parameter		Bewirtschaftung				
			konv_MAX	konv_-15%	konv_-25%	konv_UBB	biologisch
GK	N_Deposition	(kg N ha yr^{-1})	10	10	10	10	10
	N_{bio}-gebunden		11	11	11	13	28
	N-Düngung		157	133	117	145	66
	Summe N-Eintrag		**178**	**154**	**138**	**168**	**104**
	N-Emissionen		35	27	23	31	11
	N-Auswaschung		44	35	31	40	36
	N-Ertrag		84	79	74	83	51
	Summe N-Ausfuhr		**163**	**141**	**127**	**154**	**98**
	Budget Summe		**15**	**13**	**11**	**14**	**6**
MF	N_Deposition	(kg N ha yr^{-1})	14	14	14	14	14
	N_{bio}-gebunden		8	8	8	18	29
	N-Düngung		136	116	102	121	44
	Summe N-Eintrag		**158**	**138**	**124**	**153**	**87**
	N-Emissionen		40	33	28	37	16
	N-Auswaschung		33	26	22	34	14
	N-Ertrag		82	78	74	81	60
	Summe N-Ausfuhr		**155**	**137**	**124**	**152**	**90**
	Budget Summe		**3**	**1**	**0**	**1**	**-3**
OH	N_Deposition	(kg N ha yr^{-1})	8	8	8	8	8
	N_{bio}-gebunden		11	11	11	12	23
	N-Düngung		153	130	115	141	55
	Summe N -Eintrag		**172**	**149**	**134**	**161**	**86**
	N-Emissionen		11	9	7	10	2
	N-Auswaschung		76	57	46	73	33
	N-Ertrag		73	71	68	68	44
	Summe N-Ausfuhr		**159**	**136**	**122**	**151**	**80**
	Budget Summe		**13**	**13**	**12**	**10**	**6**

Die errechneten Daten von Tabelle 14 zeigen, dass ein Umstieg von intensiv konventioneller Bewirtschaftung (konv_MAX) auf eine Bewirtschaftung mit Biodiversitätsflächen (konv_UBB) einen Rückgang der Emissionen um 1 bis 4 kg N ha yr^{-1} erwirkt. Wird statt konv_MAX die Variante konv_-15% gewählt, so sind Stickstoffemissionseinsparungen zwischen 2 und 8 kg N ha yr^{-1}. Der Umstieg von konv_-15% auf konv_-25% bringt eine weitere Reduktion von 2 bis 4 kg N ha yr^{-1}. Die mit Abstand größten Einsparungen an N-Emissionen werden durch die biologische Bewirtschaftung erzielt. Hier werden beim Umstieg von konv_-25% auf biologisch zwischen 5 und 12 kg N ha yr^{-1} weniger Emissionen freigesetzt.

Die regionalen Unterschiede im N Budget sind in Abbildung 11 auf einem Blick zu sehen. N_2O macht in allen Regionen weniger als 1% des N-Austrags aus. Bei den Gasemissionen macht N_2 den größten Anteil in allen Regionen aus. Vor allem im GK entweicht N aus dem Boden als N_2. Wichtig sind auch die NO_3- Auswaschungsraten die zwischen 16% (MF biologisch) und 48% (OH konv_UBB) der N-Ausfuhr darstellen. Im OH ergeben die höheren Düngerraten bei relativ niedrigeren Erträgen (verglichen mit GK) bei den konventionellen Varianten die höchsten N-Überschüsse in dieser Studie (Tabelle 15). Die modellierten N_2O Emissionen sind im OH am niedrigsten, dafür geht in dieser Region z.B. bei konv_UBB mehr N durch Auswaschung verloren als mit dem Ertrag abgeführt wird. Generell werden die modellierten NO_3- Verluste durch Jahre mit hohen Niederschlagsraten begünstigt.

Das Verhältnis kg N_2O-N zu kg TM Ertrag macht es möglich düngungsintensivere, ertragreiche Kulturen und Fruchtfolgen mit hohen durchschnittlichen N_2O Emissionsraten mit weniger intensiven Kulturen bzw. Fruchtfolgen zu vergleichen. In Tabelle 14 sehen wir, dass die konventionelle Fruchtfolge mit reduzierten N-Dünger (konv_-15% und konv_-25%) in fast allen Fällen ein besseres Verhältnis N_2O zu Ertrag haben als die biologische Variante. Am schlechtesten scheiden konv_MAX und konv_UBB in alle Regionen ab. Das bedeutet, dass diese Varianten die höchsten N-Überschüsse und die niedrigste NUE haben. Dagegen erzielt die biologische Variante die geringsten N-Überschüsse und höchsten NUE.

Die Nutzungseffizienz, das heißt wie viel % von der N-Düngemenge in N-Ertrag gebunden wird, ist bei der biologischen Bewirtschaftung merkbar höher als jener der konventionellen Varianten (Tabelle 14). Dafür sind die ertragsbasierten N_2O Emissionen, das heißt wie viele kg N_2O-N pro kg TM per ha^{-1} emittiert wird, am niedrigsten in den konv_-25% Varianten. Die % NUE reichen bei den unterschiedlichen Bewirtschaftungssystemen und Regionen von 42% im OH konv_MAX bis 69% im OH biologisch. Die biologische Bewirtschaftung hat in allen Regionen eine höhere NUE als die intensiver gedüngten konventionelle Varianten die proportional auch einen höheren N-Überschuss haben (auch Tabelle 14). Sowohl die deutsche Studie von Lin *et al.* (2016), als auch Schroeck *et al*. (2019), die für das Obere Ennstal NUE Werte bei drei Ackerfruchtfolgen berechneten, kamen zu höheren NUE (74% bis 95%), als in der Studie ermittelt wurden. Beide Arbeiten zeigten auch die große Spannweite zwischen unterschiedlichen Kulturen auf. So entscheidet die Kulturzusammensetzung die NUE einzelner Fruchtfolgen.

Der netto N-Überschuss reicht im Schnitt von 27 bis 98 kg N ha^{-1} und spiegelt in allen Regionen die Düngungsintensität wider. Es gibt eine sehr große Spannweite der jährlichen N-Überschüsse. So sind sie in dieser Studie nicht nur von der Kultur, sondern auch von klimatischen und standortspezifischen Parametern stark beeinflusst. Auch die Vorfruchtwirkung darf nicht außer Acht gelassen werden. Stickstoffüberschüsse sind potentielle Quellen für NO_3- und N_2O und sollten möglichst vermieden

werden. Die Europäische Umweltagentur (EEA) sammelt seit Jahren Stickstoffbilanzen der Europäischen Länder. Die Tendenzen zeigen in den meisten Ländern einen Rückgang der N-Überschüsse. Die für Österreich errechnete mittlere netto Bilanz für die Periode 2005 bis 2017 lag mit unter 20 kg N ha^{-1} yr^{-1} im Schnitt niedriger als der Überschuss der intensiv bewirtschafteten Flächen in dieser Studie. Die hier errechneten höchsten N-Überschüsse sind für die konventionellen Varianten in OH modelliert worden. Dies mag an dem hohen Anteil von Mais und Ölkürbis in der FF liegen. Hohe N-Überschüsse sind auch in einer anderen Studie für vergleichbar intensiv bewirtschaftete Regionen berechnet worden (BMNT, 2013). Wenn diese N-Überschüsse nicht als organischer N in ober- oder unterirdischer Biomasse gebunden werden, gehen sie durch Emissionen oder Auswaschung verloren.

Der geringe N-Überschuss und die hohe NUE der biologischen Bewirtschaftungsvariante kann auch auf die Art des Düngers zurückgeführt werden. Neben verfügbaren Wirtschaftsdünger erfolgt die N-Düngung über die Fruchtfolge durch den Anbau von Leguminosen und Soja.

Tabelle 15: Durchschnitt der N-Nutzungseffizienz (NUE), ertragsbasiertem N_2O (kg N_2O-N TM^{-1}) und N-Überschuss als Differenz des N-Inputs und N-Ertrags aller Kulturen in allen Bewirtschaftungssystemen in allen Regionen für die Jahre 2005 – 2014.

Region	Bewirtschaftung	NUE [%]	N_2O Anteil Ertrag [kg N_2O-N kg TM^{-1}]	N Überschuss [kg N ha^{-1} yr^{-1}]
GK	konv_MAX	48	0.21	93
	konv_-15	51	0.15	75
	konv_-25	53	0.12	65
	konv_UBB	51	0.20	85
	biologisch	67	0.18	52
MF	konv_MAX	51	0.24	76
	konv_-15	55	0.19	59
	konv_-25	59	0.16	49
	konv_UBB	53	0.25	71
	biologisch	68	0.21	27
OH	konv_MAX	42	0.34	98
	konv_-15	47	0.29	78
	konv_-25	49	0.25	65
	konv_UBB	43	0.37	93
	biologisch	69	0.26	42

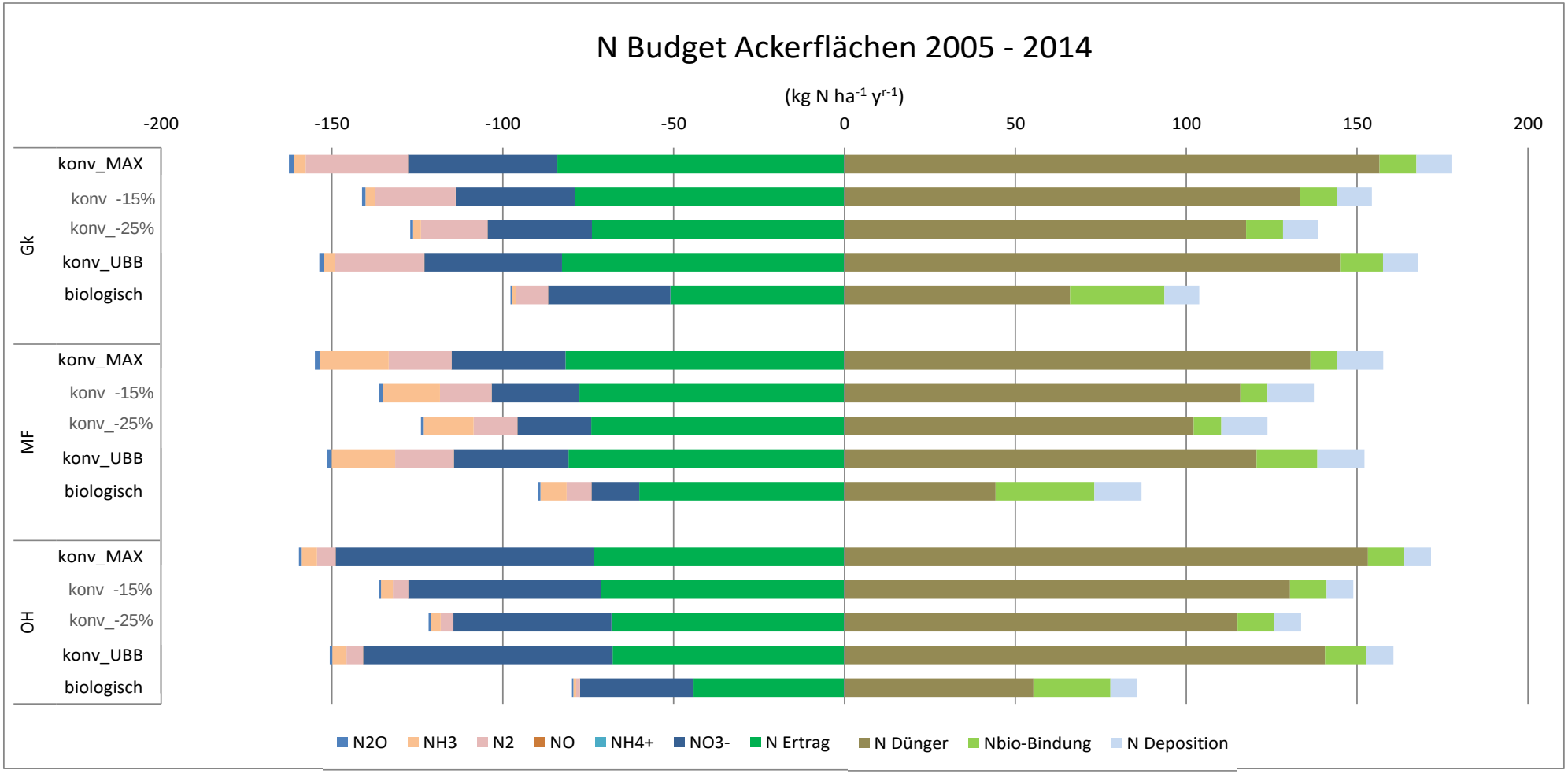


Abbildung 11: N-Budget (kg N ha^{-1} yr^{-1}) aller Bewirtschaftungsvarianten bei den Ackerkulturen als Mittelwerte der 10 Jahren (2005 – 2014) in allen Regionen.

3.2 Grünlandböden

3.2.1 N_2O Emissionen

Die N_2O Emissionen der Grünlandböden reichen von 0.6 bis 6.2 kg N_2O-N ha^{-1} yr^{-1} (Tabelle 16) und liegen so im Bereich von gemessenen Werten europäischer Graslandböden (Abalos *et al*. 2016). Wie im Ackerland hat auch im Grünland die Art der Bewirtschaftung (vor allem die Höhe der N-Düngung) einen Einfluss auf die Menge der N_2O Emissionen. Im Vergleich zu den konventionellen Varianten (konv_MAX und konv_UBB) wird unter biologischer Bewirtschaftung deutlich weniger N_2O emittiert (Abbildung 12). Beim Umstieg von konv_MAX auf konv_UBB können in allen Regionen geringfügige Mengen an N_2O eingespart werden (0.03 – 0.06 kg N_2O-N ha^{-1}; nicht signifikant; $p>0.05$).

In der Region OH wurden die höchsten N_2O Emissionen im Vergleich zu den anderen Gebieten berechnet. Die N_2O Emissionen in konv_MAX und konv_UBB sind signifikant höher als bei der biologischen Bewirtschaftung ($p<0.001$). Die hohen N_2O Emissionen im OH korrelieren mit höheren Jahrestemperaturen und höheren Niederschlägen (z.B. v.a. im Jahr 2014).

Die niedrigsten mittleren, jährlichen N_2O Emissionen sind mit jeweils 0.95 kg N_2O-N ha^{-1} und 0.97 N_2O-N ha^{-1} bei der biologischen Bewirtschaftung im FL und ET simuliert worden. Innerhalb der Bewirtschaftungsvarianten sind die Emissionen der intensiven Grünlandflächen im ET und FL nicht signifikant unterschiedlich. Ein signifikanter Unterschied zeichnet sich jedoch zwischen den anderen untersuchten Regionen ab (Abbildung 12).

Tabelle 16: Mittlere, niedrigste (Minimum) und höchste (Maximum) jährliche N_2O Emissionen nach Bewirtschaftung in den vier Regionen Ennstal (ET), Flachgau (FL), Grieskirchen (GK) und Oststeirisches Hügelland (OH)

Region	Bewirtschaftung	Mittelwert	Minimum	Maximum
			[kg N_2O-N ha^{-1}]	
ET	konv_MAX	1.62	0.8 -	3.5
	konv_UBB	1.57	0.8 -	3.4
	biologisch	0.97	0.7 -	1.9
FL	konv_MAX	1.53	1.0 -	2.0
	konv_UBB	1.50	1.0 -	2.0
	biologisch	0.95	0.8 -	1.1
GK	konv_MAX	1.99	1.1 -	4.3
	konv_UBB	1.95	1.1 -	4.2
	biologisch	1.13	0.6 -	1.6
OH	konv_MAX	3.28	2.3 -	6.2
	konv_UBB	3.22	2.2 -	6.0
	biologisch	1.78	1.3 -	2.1

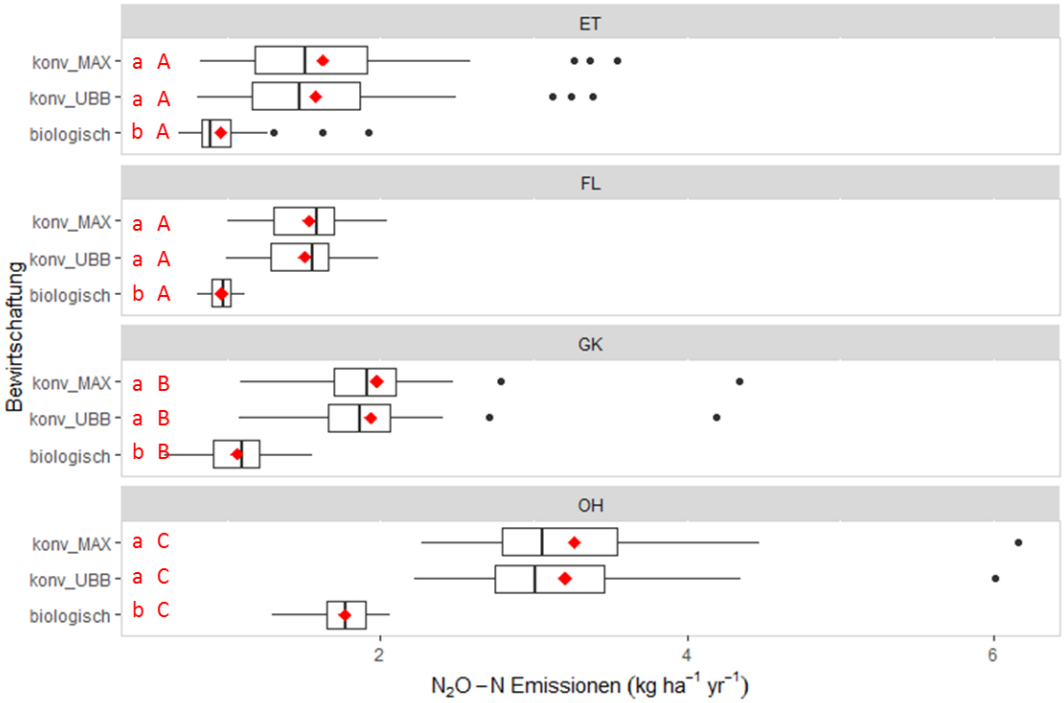


Abbildung 11: N_2O Emissionen der modellierten Grünlandböden in Ennstal (ET), Flachgau (FL), Grieskirchen (GK) und Oststeirisches Hügelland (OH) bei unterschiedlicher Bewirtschaftung (konv_UBB = konventionelle Bewirtschaftung nach UBB Bestimmung; konv_MAX = konventionelle Bewirtschaftung mit maximal erlaubter Mineraldüngemengen; biologisch = biologische Bewirtschaftung). Kleine Buchstaben zeigen die Signifikanzen zwischen den Bewirtschaftungsvarianten in der Region, große Buchstaben zeigen die regionalen Unterschiede innerhalb der Bewirtschaftungsvarianten, alle Signifikanzen p<0.05. ◆ Mittelwert; Punkte = Ausreißer.

3.2.1.1 Einfluss von Klima und Bodenart auf den N_2O Emissionen in Grasland

Die jährlichen N_2O Emissionen der Grünlandböden korrelieren in allen Regionen positiv mit der Menge an ausgebrachtem N-Dünger.

Im OH, wo bei allen Bewirtschaftungsvarianten signifikant mehr N_2O emittiert wird, summieren sich die höchsten N_2O Emissionen in Jahre mit höheren mittleren Lufttemperaturen (r_s = 0.67, p<0.001) und höherem Niederschlag (r_s = 0.41, p<0.5). Bei der biologischen Variante im OH sind die niedrigsten N-Überschüsse und die niedrigsten N_2O Emissionen in den Jahren mit hoher NUE (Tabelle 17).

Im ET sind bei allen Bewirtschaftungsvarianten die N_2O Emissionen in wärmeren Jahren höher (r_s > 0.31, p<0.01). Zudem sind die N_2O Emissionen niedriger bei Bedingungen, die den Pflanzenwuchs fördern (höhere Erträge und niedrigere N-Überschüsse).

Im FL bringen hohe N-Düngergaben höhere N-Überschüsse und N_2O Emissionen. Standortparameter wie Klima oder Bodeneigenschaften sind in dieser Studie für die N_2O Emissionen nicht signifikant wichtig.

Im GK sind Emissionsraten sowie Erträge bei höherer Düngerausbringung höher (r_s = 0.68 und r_s = 0.71, beide p<0.001)

Tabelle 17: Korrelationen zwischen den jährlichen N_2O Emissionen der intensiv bewirtschafteten Grünlandböden in den vier Regionen Ennstal (ET), Flachgau (FL), Grieskirchen (GK) und Oststeirisches Hügelland (OH) und einige Standort- und Bewirtschaftungsparameter

Region	Bewirtschaftung	Lufttemperatur (°C)	JahresNS (mm)	Bodenwasser (%) 10 cm Tiefe	N-Düngung (kg ha-1)	N-Überschuss	dt TM Ertrag ha-1
ET	alle_V	0.31 ***	-0.16 *	0.27 **	0.52 ***	0.14 n.s.	0.66 ***
	konv_MAX	0.39 **	-0.24 n.s.	0.41 **	na	-0.64 ***	0.52 ***
	konv_UBB	0.39 **	-0.24 n.s.	0.41 **	-0.38 **	-0.64 ***	0.53 ***
	biologisch	0.37 **	-0.19 n.s.	0.40 **	-0.06 n.s.	-0.41 **	0.67 ***
FL	alle_V	-0.05 n.s.	-0.13 n.s.	-0.19 n.s.	0.71 ***	0.71 ***	0.44 ***
	konv_MAX	-0.19 n.s.	-0.27 n.s.	-0.14 n.s.	0.3 n.s	0.34 n.s	-0.59 ***
	konv_UBB	-0.18 n.s.	-0.26 n.s.	-0.14 n.s.	0.11 n.s	0.31 n.s	-0.59 ***
	biologisch	0.24 n.s.	-0.03 n.s.	-0.74 ***	0.41 n.s	-0.06 n.s	0.00 n.s
GK	alle_V	0.17 n.s.	-0.13 n.s.	0.06 n.s.	0.68 ***	0.09 n.s.	0.71 ***
	konv_MAX	0.30 n.s.	-0.22 n.s.	0.19 n.s.	na	-0.43 **	0.31 n.s
	konv_UBB	0.31 *	-0.21 n.s.	0.20 n.s.	na	-0.45 **	0.35 *
	biologisch	0.17 n.s.	-0.23 n.s.	0.39 *	-0.24 n.s.	-0.76 ***	0.59 ***
OH	alle_V	0.32 **	0.19 n.s.	-0.13 n.s.	0.71 ***	0.22 *	0.22 *
	konv_MAX	0.67 ***	0.41 *	0.12 n.s.	na	0.21 n.s.	-0.17 n.s.
	konv_UBB	0.67 ***	0.41 *	0.11 n.s.	na	0.2. n.s.	-0.17 n.s.
	biologisch	0.26 n.s.	0.11 n.s.	0.28 n.s.	-0.07 n.s.	-0.61 ***	0.47 **

In Abbildung 13 sind die jährlichen N_2O Emissionen der konv_MAX und der biologischen Bewirtschaftungsvarianten in allen vier Regionen abgebildet (konv_UBB zeigt fast idente Ergebnisse wie konv_MAX und wird aus Platzgründen nicht angezeigt). Bei der Modellierung werden die gleichen Standorte mit den gleichen Bewirtschaftungsaktivitäten, mit unterschiedlichem Dünger und verschiedenen Düngemenge simuliert. Wir sehen, dass die jährlichen N_2O Emissionen in konv_MAX höher sind und viel stärker variieren als die biologische Variante. Das bedeutet, dass im Gegensatz zu den Ergebnissen im Acker in der intensiver gedüngten Variante konv_MAX die N_2O Emissionen viel stärker von Niederschlag und Temperatur beeinflusst werden, während unter biologischer Bewirtschaftung die Unterschiede zwischen den Jahren von 2005 bis 2014 in den untersuchten Regionen sehr gering sind.

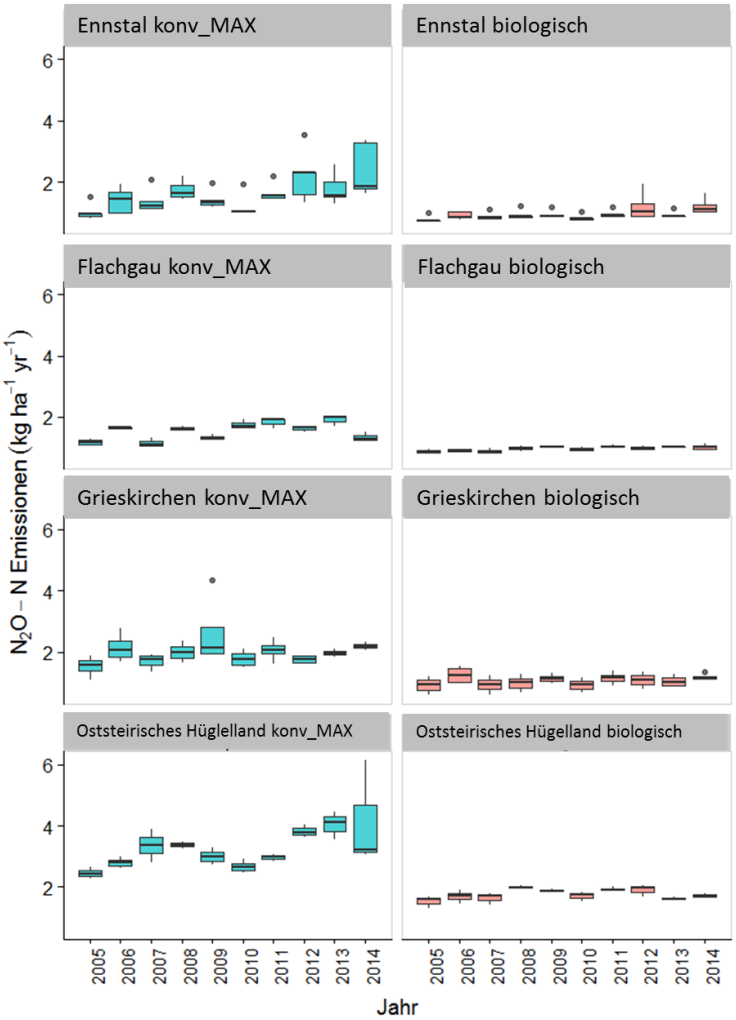


Abbildung 12: jährliche N_2O Emissionen bei konv_MAX und biologischer Grünlandbewirtschaftung in den vier Regionen aufgeschlüsselt nach Jahren

Die Bodenart spielt bei den N_2O Emissionen von Grünlandböden kaum eine Rolle. In Abbildung 14 sind die jährlichen N_2O Emissionen aller Bodenarten und deren Signifikanzen abgebildet. Hier ist ersichtlich, dass im ET die N_2O Emissionen aller Bewirtschaftungsvarianten signifikant höher bei

schluffigem Boden sind (SILT) ($p<0.001$). Im FL und GK sind Unterschiede nur bei biologischer Bewirtschaftung zu sehen und im OH ist kein signifikanter Unterschied feststellbar. In der Abbildung 14 sind weiters die Jahre mit einer hohen Anzahl an Ausreißern gekennzeichnet. Besonders 2012 und 2014 traten im ET und OH erhöhte Emissionen auf. Im GK war dies 2009 der Fall.

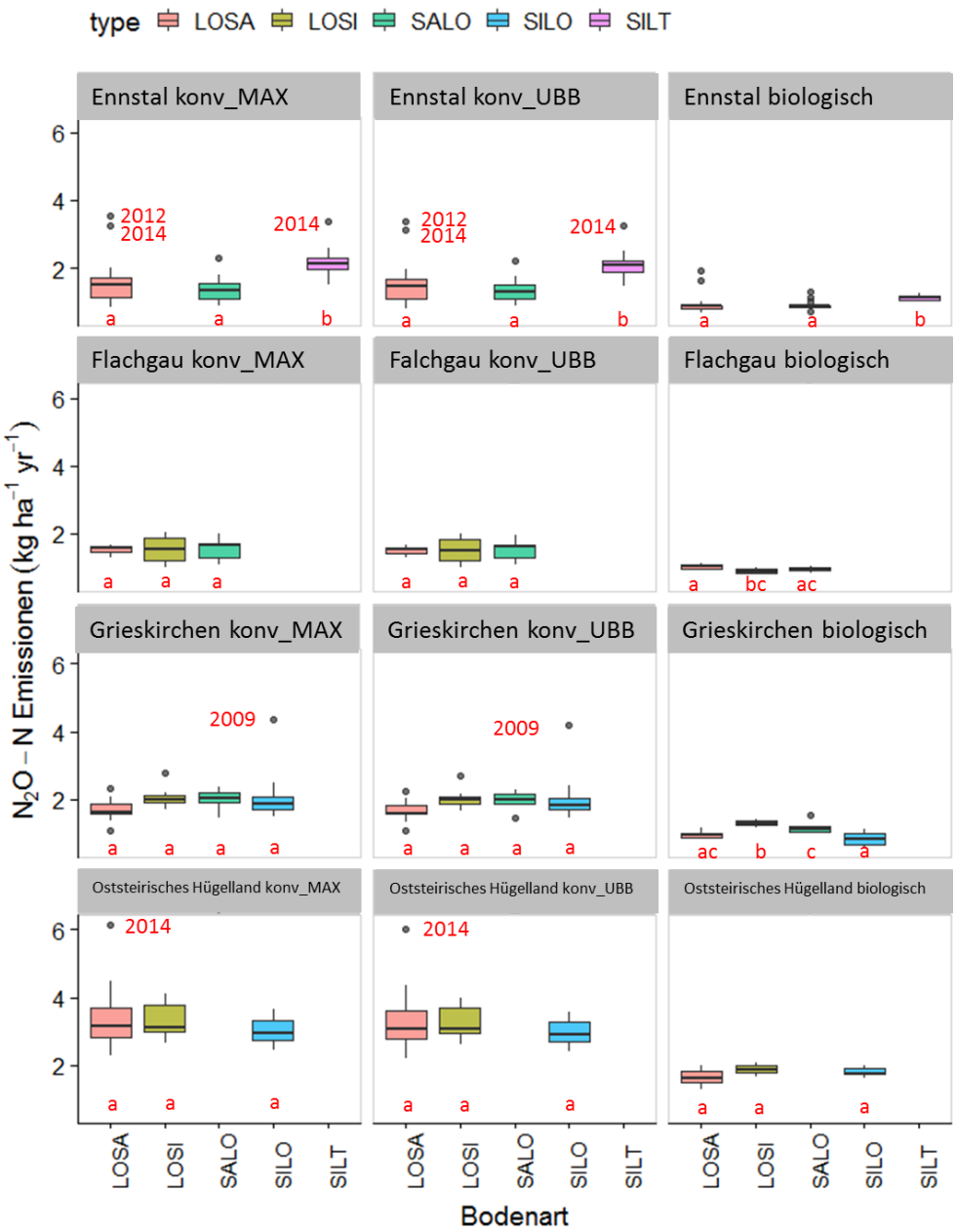


Abbildung 13: Jährliche N_2O Emissionen von konv_MAX, konv_UBB und biologischer Bewirtschaftung aller vier Regionen nach Bodenart. Punkte beschreiben Ausreißer, kleine Buchstaben zeigen die Signifikanzen innerhalb der Bewirtschaftungsvarianten der Regionen.

3.2.2 Erträge

Die modellierten mittleren Erträge in allen Varianten reichen von 62 bis 93 dt TM ha^{-1}. Vergleicht man die vier Grünlandregionen so sind die Erträge im FL am höchsten (77 bis 93 dt TM ha^{-1}) und im ET am niedrigsten (62 bis 70 dt TM ha^{-1}). Es ist zu beachten, dass hier bei dieser Methode, wie im

Ackerland, die oberirdische Biomasse mit einem C-Gehalt von 45% im Modellierungsprogramm berechnet wird. Aus dem C-Ertrag errechnet sich die TM.

Tabelle 18: Übersicht der modellierten, mittleren Erträge in dt Trockenmasse (TM) pro Hektar und Jahr

Region	Kultur	konv_MAX [dt TM ha^{-1}]	konv_UBB [dt TM ha^{-1}]	biologisch [dt TM ha^{-1}]
ET	Grünland intensiv	69.7	68.3	62.2
FL	Grünland intensiv	92.6	91.1	76.5
GK	Grünland intensiv	87.2	86.0	68.4
OH	Grünland intensiv	74.0	72.7	68.7

Bei der Variante konv_UBB sind die N_2O Emissionen und die Ertragseinbußen im Vergleich zur maximalen Düngevariante konv_MAX in allen betrachteten Regionen generell gering (< 5%) (Abbildung 15). Betrachtet man die Ergebnisse der biologischen Bewirtschaftung im Vergleich zu konv_MAX, so sind die Reduktion der N_2O Emissionen signifikant höher als die Ertragseinbußen. So zeigen sich im FL die geringsten N_2O Einsparungen (rund 35%) und die höchsten Ertragsverluste (knapp 20%). Dagegen wurden bei dieser Variante für GK die höchsten N_2O Einsparungen (> 45%) berechnet. Ebenso positiv schneidet das OH in dieser Hinsicht ab und weist noch dazu die geringsten Ertragsverluste auf.

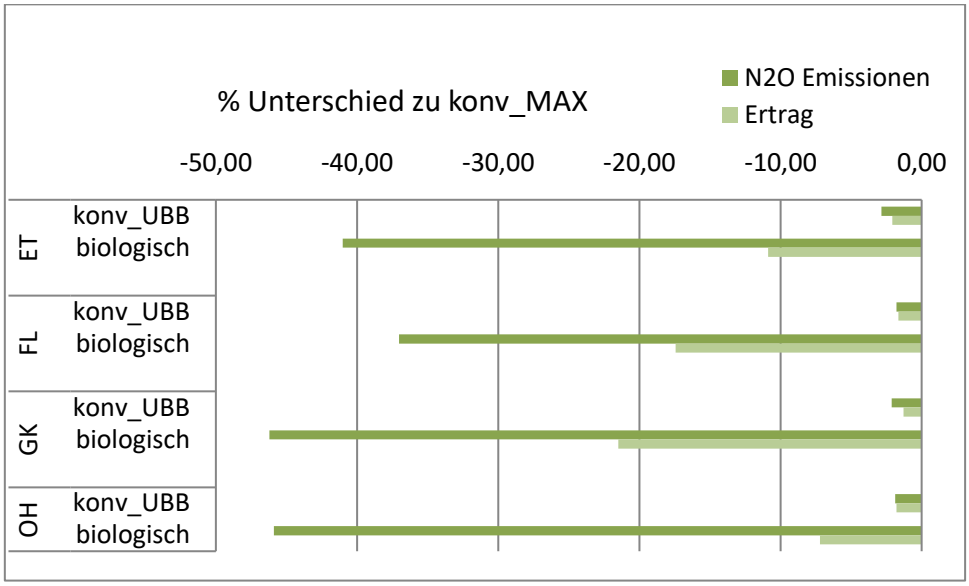


Abbildung 14: % Unterschied zwischen N_2O Emissionen und Erträgen von konv_UBB und biologischer Bewirtschaftung, sowie der konv_MAX (=0). Jährliche Mittelwerte aller Grünlandböden in den vier Regionen.

3.2.3 Stickstoffflüsse und N-Überschuss

Das N-Budget ergibt sich durch die Gegenüberstellung der Einträge (N-Deposition, N_{bio}-gebunden, N-Düngung) abzüglich der Austräge (N-Emissionen, N-Auswaschung, N-Ertrag) im System. Tabelle 19 zeigt die nach der Ausdehnung der unterschiedlichen Bodenarten gewichteten N-Budgets der Grünlandflächen für alle Bewirtschaftungsformen in allen Regionen. Alle N-Budgets zeigen, dass im

Schnitt jedes Jahr Stickstoff in das System Boden eingespeist wird. Die Rücklagen reichen im 10-jährigen Schnitt von 5 bis 17 kg N ha^{-1} yr^{-1} und sind bei konv_MAX im GK am höchsten.

Der Umstieg von intensiv konventioneller Bewirtschaftung (konv_MAX) auf die Bewirtschaftung mit Biodiversitätsflächen (konv_UBB) bringt in Bezug auf Eimissionseinsparungen nur einen Rückgang um maximal 1 kg N ha yr^{-1} mit sich . Der Umstieg von konv_MAX bzw. konv_UBB auf eine biologische Grünlandbewirtschaftung bringt dagegen große Einsparungen an Emissionen von 6 bis 14 kg N ha yr^{-1}.

Der größte N-Anteil wird dem Boden mit der Düngung zugeführt, der höchste Austrag erfolgt mit der Ernte. Die regionalen Unterschiede sind in Abbildung 16 auf einem Blick zu sehen.

Bei den Gasemissionen macht N_2 den größten Anteil im FL und OH aus. Vor allem im FL entweicht unter konv_MAX und konv_UBB das meiste N aus dem Boden als N_2 (22.9 und 22.4 kg N ha yr^{-1}). Unter biologischer Bewirtschaftung wird hingegen im GK am meisten N_2 freigesetzt (13.9 kg N ha yr^{-1}).

Im OH machen die N_2O Emissionen 1.5% der N-Verluste aus, in den anderen Regionen, unter Berücksichtigung aller Bewirtschaftungsvarianten, 1% oder weniger.

Die mittleren, jährlichen NO_3^- Auswaschungsraten reichen von 5 bis 29 kg NO_3^--N ha^{-1} und sind am höchsten im ET und GK.

Die Unterschiede zwischen konv_MAX und konv_UBB sind in alle Regionen gering.

Tabelle 19: Gewichtete N-Budgets der drei Bewirtschaftungsvarianten von intensiv bewirtschafteten Grünlandflächen in den Regionen Ennstal (ET), Flachgau (FL), Grieskirchen (GK), und Oststeirisches Hügelland (OH)

		ET			FL			GK			OH		
		konv_MAX	konv_UBB	biologisch	konv_MAX	konv_UBB	biologisch	konv_MAX	konv_UBB	biologisch	konv_MAX	konv_UBB	biologisch
N_Deposition	(kg N ha yr^{-1})	9	9	9	21	21	21	18	18	18	16	16	16
N_{bio}-gebunden		10	10	12	4	4	13	14	15	15	2	2	17
N-Düngung		160	155	93	200	195	97	200	196	111	200	196	122
Summe N-Eintrag		**179**	**174**	**114**	**225**	**221**	**130**	**232**	**229**	**143**	**218**	**214**	**155**
N-Emissionen	(kg N ha yr^{-1})	18	18	12	25	24	11	23	22	15	22	21	11
N-Auswaschung		29	28	16	11	11	5	22	21	13	12	12	8
N-Ertrag		115	112	74	182	178	107	171	168	104	180	176	130
Summe N-Ausfuhr		**162**	**158**	**102**	**218**	**213**	**123**	**215**	**211**	**132**	**214**	**209**	**148**
Budget Summe		**17**	**17**	**12**	**7**	**7**	**7**	**17**	**17**	**12**	**5**	**5**	**7**

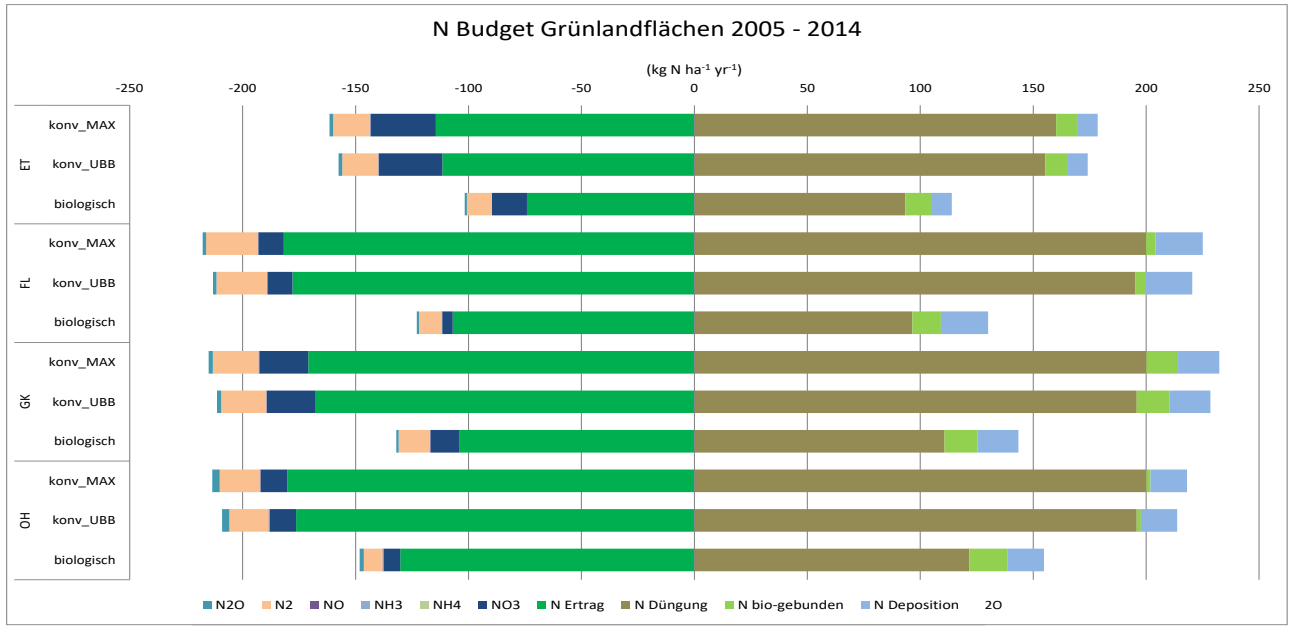


Abbildung 15: N-Budget (kg N ha^{-1} yr^{-1}) aller Bewirtschaftungsvarianten im Grünland als Mittelwerte der 10 Jahren (2005 – 2014) in allen Regionen.

Die Tabelle 20 zeigt, dass sich die durchschnittlichen NUE unterschiedlicher Bewirtschaftungssysteme kaum von jenen, anderer Systeme unterscheidet (OH > FL > GK > ET), während die N_2O Emissionen pro kg geernteter dt TM im OH am höchsten und FL am niedrigsten sind. Das bedeutet z.B. dass im ET mit mittleren Ertragslage und niedrigere Düngemengen mehr N_2O pro dt Ertrag emittiert wird als im FL mit hoher Düngerintensität. Bei den N Überschüssen sehen wir, dass die netto Bilanz reicht von 23 bis 64 kg N ha-1 yr-1. Sie sind bei konventioneller Bewirtschaftung im ET am höchsten und bei biologischer Bewirtschaftung im FL am niedrigsten. Hohe NUE und hohe Erträge reduzieren die jährlichen N_2O Emissionen (Tabelle 17).

Tabelle 20: Durchschnitt der N-Nutzungseffizienz (NUE), ertragsbasiertem N_2O (kg N_2O-N TM^{-1}) und N-Überschuss als Differenz zwischen N-Input und N-Ertrag des intensiven Grünlands in allen Bewirtschaftungssystemen und Regionen im Zeitraum 2005 – 2014.

Region	Bewirtschaftung	NUE [%]	N_2O kg TM^{-1}	N Überschuss [kg N ha yr^{-1}]
ET	konv_MAX	65	0.23	64
	konv_UBB	65	0.23	63
	biologisch	65	0.16	40
FL	konv_MAX	81	0.17	43
	konv_UBB	81	0.17	42
	biologisch	82	0.13	23
GK	konv_MAX	76	0.23	61
	konv_UBB	76	0.22	60
	biologisch	75	0.16	39
OH	konv_MAX	82	0.45	38
	konv_UBB	82	0.45	37
	biologisch	84	0.26	25

Betrachtet man das gesamte System (Hoftorbilanz), so ist die Ökosystemverträglichkeit des biologischen Landbaus jedenfalls zu unterstreichen (Umweltbundesamt 1996).

4 FAZIT UND AUSBLICK

In diesem Projekt wurden die Auswirkungen unterschiedlicher ÖPUL-Maßnahmen auf die Emissionen des hochwirksamen Treibhausgases N_2O (Lachgas) mittels eines prozessorientierten mathematischen Modells berechnet. Dazu wurden ausgewählte Kleinproduktionsgebiete herangezogen. Die Modellergebnisse wurden grafisch und statistisch ausgewertet und in Beziehung zur wissenschaftlichen Literatur gesetzt. Zu den untersuchten Maßnahmen zählen folgende Bewirtschaftungsvarianten: intensive konventionelle Bewirtschaftung (konv_MAX), konventionelle Bewirtschaftung mit umweltgerechten und biodiversitätsfördernden Bewirtschaftungsmaßnahmen (konv_UBB), konventionelle Bewirtschaftung mit einem um 15% reduzierten Mineraldüngereinsatz (konv_-15%), konventionelle Bewirtschaftung mit einem um 25% reduzierten Mineraldüngereinsatz (konv_-25%), biologische Wirtschaftsweise (biologisch).

Seit Projektbeginn konnten regionalspezifische Fruchtfolgen in bis zu 35 Rotationsdurchgängen über 10 Jahre erfolgreich modelliert werden. Besonders die Abbildung der biologisch bewirtschafteten Flächen war eine große Herausforderung, da die einzelnen Kulturen für die österreichischen Bedingungen erst im Modell validiert werden mussten.

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Höhe der Stickstoffdüngung und den N_2O Emissionen. Es können folgende Aussagen getroffen werden:

I: Einsparungspotenzial durch Düngereduktion:

Bereits eine Reduktion des Düngemitteleinsatzes um 15% hat eine hohe Wirkung auf die Reduktion von Lachgas, gleichzeitig verringern sich die Erträge relativ wenig. Eine weitere Reduzierung des Düngemitteleinsatzes um insgesamt 25% bei konventioneller Bewirtschaftung ergibt eine weitere Reduktion, allerdings nicht proportional bzw. in geringerem Ausmaß. Werden die Flächen biologisch bewirtschaftet, so kommt es zu den höchsten N_2O Einsparungen. Die Maßnahmen in ihrer Wirkung in absteigender Reihenfolge: biologisch > konv_-25% > konv_-15% > konv_UBB > konv_MAX. Bei reduzierter Düngergabe (konv_-15% und konv_-25%) gab es bei **allen Ackerkulturen** geringere N_2O Emissionen, unabhängig von Bodenart und Klima.

Betrachtet man die Regionen, so wird im Oststeirischen Hügelland das wenigste N_2O emittiert, gefolgt von den Regionen Marchfeld und Grieskirchen. Im Marchfeld treten allerdings vereinzelt hohe Spitzenemissionen von N_2O auf. Hier variieren die Werte zwischen den Jahren in Abhängigkeit von Klima und Fruchtfolge stark. Abgesehen von der Düngemenge, sind der Gesamt-Stickstoffgehalt (N_{org}) des Bodens und der N-Überschuss neben den klimatischen Bedingungen (Niederschlag, Luft-

und Bodentemperatur, Bodenwassergehalt) Faktoren, die die Menge der N_2O Emissionen beeinflussen.

Betrachtet man die verschiedenen Bodenarten, so werden von schwereren bzw. lehmigen Böden unter konventioneller Bewirtschaftung tendenziell höhere Mengen an N_2O emittiert. Im Gegensatz dazu finden sich, im Hinblick auf den Einfluss der Bodenart, unter biologischer Bewirtschaftung keine signifikanten Unterschiede.

Beim Anbau von Gemüse entweicht im Mittel das meiste N_2O, außerdem von den Kulturen Mais, Zuckerrüben und Wintergetreide. Bei Mais, Wintergerste und Gemüse ist jedoch durch eine verhältnismäßig geringe Minderung der applizierten Düngermengen ein großes Einsparungspotenzial vorhanden.

Eine Reduktion des N-Düngers wirkt sich maßgeblich auf den Ertrag aus. Generell verringert sich die Ertragsmenge konv_MAX > konv_UBB > konv_-15% > konv_-25% > biologisch. Allerdings werden die N_2O Emissionen durchgehend prozentuell stärker reduziert als die Erträge.

Die Stickstoffbudgets aller untersuchten Varianten (mit Ausnahme von biologisch und konv_-25% im MF) zeigen positive Werte. Die Rücklagen reichen im 10-jährigen Schnitt von 1 bis 15 kg N ha^{-1} yr^{-1}. Auch hier schneidet die biologische Wirtschaftsweise am besten ab. Im N-Budget haben die Auswaschungsraten von NO_3^- den größten Anteil und liegen zwischen 16% (Marchfeld) und 48% (Oststeirisches Hügelland) der N Verluste. Die Stickstoffnutzungseffizienz reicht von 42 bis 69% und ist bei biologischer Bewirtschaftung am höchsten im Vergleich zu den anderen Varianten. Allerdings findet man eine große Spannweite zwischen den Kulturen. Die ertragsbasierten N_2O Emissionen sind am geringsten in den konv_-25% Varianten. Der N-Überschuss reicht im Schnitt von 27 bis 98 kg N ha^{-1}. Die Werte sind von Kultur, Klima und Standort beeinflusst.

<u>II: Einsparungspotenzial durch umweltgerechte und biodiversitätsfördernde Bewirtschaftungsmaßnahmen (UBB)</u>

Betrachtet man die konventionellen Ackerflächen konv_MAX und konv_UBB, so führt die Maßnahme UBB zur Einsparung an Emissionen von etwa 0.3-0.6 kg N_2O ha^{-1} yr^{-1}.

Die Implementierung von 5 – 6% UBB Fläche (in konv_UBB) reduziert die durchschnittlichen N_2O Emissionen aus intensiv konventionell bewirtschafteten Grünlandböden, aber diese Reduktion ist im Durchschnitt nicht statistisch signifikant. Dagegen bewirkt eine deutliche Reduktion der Düngermengen eine statistisch signifikante Reduktion der N_2O Emissionen in allen Regionen, unabhängig von der Bodenart.

III: Einsparungspotenzial durch biologische Bewirtschaftung

Konventionell bewirtschaftete **Grünlandflächen** emittieren deutlich mehr N_2O im Vergleich zu biologisch bewirtschafteten Flächen, d.h. im Vergleich zur konventionellen Bewirtschaftung führt die biologische Wirtschaftsweise zu geringeren N_2O Emissionen. Jedoch liegen auch die Erträge deutlich unter jenen der konventionellen Bewirtschaftung. Die Spannweiter der Ertragseinbußen variiert allerdings zum Teil stark.

Die biologische Bewirtschaftung verursacht in allen Regionen bei **Acker- und Grünlandnutzung** die geringsten N_2O-Emissionen. Grund dafür ist der geringere Einsatz von N-Dünger. Im Gegensatz dazu begünstigt die konventionelle Bewirtschaftung mit den höchsten Düngermengen hohe N_2O-Verluste.

Dabei wirken die mittlere Jahrestemperatur und die Niederschlagsmenge stärker auf die N_2O Emissionen der konv_MAX und konv_UBB ein, als bei der biologischen Bewirtschaftung. Das bedeutet, dass die biologische Bewirtschaftung bei klimatischen Veränderungen eher in der Lage ist Stickstoff im System Pflanze-Boden zu halten, als konventionelle Bewirtschaftungssysteme. Die biologische Bewirtschaftung zeigt demnach Vorteile nicht nur in Bezug auf Treibhausgas-Reduktion sondern auch in Bezug auf die Resilienz gegenüber Klimawandeleinflüssen. Diese Ergebnisse waren nicht unbedingt zu erwarten und sind demnach auch aus Sicht der Modellanwender/innen eine positive Überraschung.

Emissions-Minderungsmaßnahmen

Emissions-Minderungsmaßnahmen sind dort am effektivsten, wo die höchsten N_2O-Emissionen zu finden sind. Das heißt für Österreich in Regionen mit hohem Niederschlag und schweren Böden. Intensiv bewirtschaftetes Grünland ist davon besonders betroffen, aber auch Ackerkulturen wie Gemüse und Mais. Nicht nur die Düngemenge, sondern auch der Zeitpunkt der Düngung ist von Bedeutung für eine Optimierung der Stickstoffnutzungseffizienz.

In dieser Studie steht nicht die Art des Düngers (organisch vs. Mineralisch) im Vordergrund, generell sollte aber auch in Betracht gezogen werden, dass mineralischer N-Dünger ein Ressourcen-intensives Produkt ist, das mit hohem Energieaufwand und CO_2-Emissionen hergestellt werden muss. Gleichzeitig kann dieser Stickstoff nach der Ausbringung rasch verloren gehen. Im Vergleich dazu ist organischer Dünger ein natürliches Produkt, das den Stickstoff langsamer an Pflanze/Boden abgibt und daher eine höhere Stickstoffnutzungseffizienz begünstigt.

Das Bewusstsein für die Zusammenhänge zwischen Produktionsmethoden und der Freisetzung von klimawirksamen Gasen sollte bei LandwirtInnen und KonsumentInnen verstärkt gefördert werden, da ProduzentInnen und EndverbraucherInnen mit ihren Entscheidungen wesentlichen Einfluss auf die Klimabilanz haben. Das Konsumverhalten kann, in Kombination mit den ÖPUL Maßnahmen, eine klimafreundliche Landwirtschaft in Österreich wesentlich unterstützen und vorantreiben.

QUELLENVERZEICHNIS:

4.1 Literatur

Abalos D, Cardenas LM, Wu L (2016). Climate change and N_2O emissions from South West England grasslands: A modelling approach. Atmosphäric Environment 132, 249 – 257.

Ammann C, Spirig C, Leifeld J, Neftel A (2009). Assessment of the nitrogen and carbon budget of two managed temperate grassland fields. Agriculture, Ecosystems and Environment, 133, 150 – 162.

Amon B (2018). Final Report – Activity Report, NitroAustria, Nitrogen losses from Austrian agricultural soils – modelling to explore trade off-effects, Universität für Bodenkultur, Wien

Amon B, Fröhlich M, Weißensteiner R, Zablatni B, Amon T (2007). Tierhaltung und Wirtschaftsdüngermanagement in Österreich. Endbericht Projekt 1441 Auftraggeber: Bundesministerium, für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

BMLFUW (2006). Richtlinien für die sachgerechte Düngung. BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Vienna, p. 80.

BMNT (2013): Stickstoffbilanzen, Berechnung auf GWK-Gebiete, Wien, https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasserqualitaet/grundwasser/Stickstoffbilanzen.html Letzter Besuch 18.11.2019

BMNT (2015). Boden und Klima, Einflussfaktoren, Daten, Maßnahmen und Anpassungsmöglichkeiten. Wien https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiKrtqNsNPkAhVDpYsKHWOwCbgQFjAAegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.bmnt.gv.at%2Fdam%2Fjcr%3A252614ac-f452-4c9a-9534-8189c71438b9%2F34_AG_Boden_Klima.pdf&usg=AOvVaw1wa0DW6BUOTC_RPyzdICjk Letzte Besuch 15.9.2019

Bundesforschungszentrum für Wald (2013). eBod die digitale Bodenkarte von Österreich; https://bfw.ac.at

Butterbach-Bahl K, Baggs EM, Dannenmann M, Kiese R, Zechmeister-Boltenstern S (2013). Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? Philos. Trans. R. Soc. B 368. http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013. 0122.

de Ponti T, Rijk B, van Ittersum MK (2012). The crop yield gap between organic and conventional agriculture. Agricultural Systems, 108, 1 – 9.

EEA (2018). https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/agriculture-nitrogen-balance-1/assessment Letzter Besuch 09.09.2019

EEA (2019). Trends in atmospheric concentrations of CO2, CH4 and N_2O https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-4#tab-chart_5_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_polutant%22%3A%5B%22N2O%20(ppb)%22%5D%7D%7D Letzter Besuch 30.6.2019

Fuß R, Ruth B, Schilling R, Scherb H, Munch JC (2011). Pulse emissions of N_2O and CO_2 from an arable field depending on fertilization and tillage practice. Agriculture, Ecosystem and Environment, 144, 61-68.

Goossens A, De Visscher A, Boeckx P, Van Cleemput O (2001). Two-year field study on the emissions of N_2O from coarse and middle-textured Belgian soils with different land use. Nutrient Cycling in Agroecosystem 60, 23-24.

Haas E, Klatt S, Froehlich A, Kraft P, Werner C, Kiese R, Grote R, Breuer L, Butterbach-Bahl K (2013). LandscapeDNDC: a process model for simulation of biosphere-atmosphere-hydrosphere exchange processes at site and regional scale. Landscape Ecology 28, pp. 615-636.

Hölzel E (2006). Landwirtschaftliche Produktionsgebiete, aus dem Begleitheft zu RGW 7 Neu; https://www.hoelzel.at/__verlag/rgw/rgw7/pdf/landw_produktionsgebiete.pdf

Jones SK, Helfter C, Anderson M, Coyle M, Campbell C, Famulari D, Di Marco C, van Dijk N, Tang YS, Topp CFE, Kiese R, Kindler R, Siemens J, Schrumpf M, Kaiser K, Nemitz E, Levy PE, Rees RM, Sutton MA, Skiba UM (2017). The nitrogen, carbon and greenhouse gas budget of a grazed, cut and fertilised temperate grassland. Biogeosciences 14, 2069-2088.

Jungkunst HF, Freibauer A, Neufeldt H, Bareth G (2006). Nitrous oxide emissions from agricultural land use in Germany— a synthesis of available annual field data. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 169, 341-351.

Kaiser EA, Kohrs K, Kuecke M, Schnug E, Heinemeyer O, Munch JC (1998). Nitrous oxide release from arable soil: Importance of N-fertilization, crops and temporal variation. Soil Biology and Biochemistry 30, 1553-1563.

Kammann C, Grünhage L, Müller C, Jacobi S, Jäger HJ (1998). Seasonal variability and mitigation options for N_2O emissions from differently managed grasslands. Environmental Pollution 102, 179-186.

Kasper M, Foldal C, Kitzler B, Haas E, Strauss P, Eder A, Zechmeister-Boltenstern S, Amon B (2019). N_2O emissions and NO_3^- leaching from two contrasting regions in Austria and influence of soil, crops and climate: a modelling approach. Nutrient Cycling in Agroecosystems 113, DOI 10.1007/s10705-018-9965-z

Kim DG, Mishurov M, Kiely G (2010). Effect of increased N use and dry periods on N_2O emission from a fertilized grassland. Nutrient Cycling in Agroecosystems 88, 397-410.

Kim Y, Berger S, Kettering J, Tenhunen J, Haas E, Kiese R (2014). Simulation of N2O emissions and nitrate leaching from plastic mulch radish cultivation with LandscapeDNDC. Ecological Research 29, 441-454.

Kim Y, Seo Y, Kraus D, Klatt S, Haas E, Tenhunen J, Kiese R (2015). Estimation and mitigation of N2O emission and nitrate leaching from intensive crop cultivation in the Haean catchment, South Korea. Science of the Total Environment 529, pp. 40-53.

Kraus D, Weller S, Klatt S, Haas E, Wassmann R, Kiese R, Butterbach-Bahl K (2015). A new LandscapeDNDC biogeochemical module to predict CH_4 and N_2O emissions from lowland rice and upland cropping systems. Plant and Soil, pp. 125-149.

Land Steiermark 2015. Maiswurzelbohrerverordnung (2015). http://www.agrar.steiermark.at/cms/beitrag/10470082/98170585/ Letztes Besuch 20.06.2019

Leahy P, Kiely G, Scanlon TM (2004). Managed grasslands: A greenhouse gas sink or source? Geophysical Research Letters, *31, L20507*

Lin HC, Huber JA, Gerl G, Hülsenberger KJ (2016). Nitrogen balances and nitrogen-use efficiency of different organic and conventional farming systems. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 105, 1 – 23.

Manrique LA, Jones CA (1991). Bulk Density in Soils in Relation to Soil Physical and Chemical Properties. Soil Science Society of American Journal 55, 476-481.

Molina-Herrera S, Grote R, Santabárbara-Ruiz I, Kraus D, Klatt S, Haas E, Kiese R, Butterbach-Bahl K (2015). Simulation of CO_2 Fluxes in European Forest Ecosystems with the Coupled Soil-Vegetation Process Model "LandscapeDNDC". Forests 6, 1779.

Molina-Herrera S, Haas E, Klatt S, Kraus D, Augustin J, Magliulo V, Tallec T, Ceschia E, Ammann C, Loubet B, Skiba U, Jones S, Bruemmer C, Butterbach-Bahl K, Kiese R (2016). A modeling study on mitigation of N_2O emissions and NO_3 leaching at different agricultural sites across Europe using LandscapeDNDC. Science of the Total Environment 557, 128-140.

Pöllinger A, Zentner A, Brettschuch S, Lackner L, Amon B, Stickler Y (2018). Abschlussbericht TIHALO II, Erhebung zum Wirschaftsdüngermanagement aus der österreichischen Tierhaltung in Österreich, Raumberg-Gumpenstein

Ravishankara AR, Daniel JS, Portmann RW (2009). Nitrous Oxide (N_2O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. Science 326, 123-125.

Resl T, Brückler M (2016). Erträge des österreichischen Biolandbaus im Vergleich zu konventioneller Produktion, Präsentation:**https://www.ages.at/download/0/0/1732eec689dc9e9c1114ade14a1d2d58a635d417/fileadmin/AGES2015/Service/AGES-Akademie/2016-10-13_Foodsecurity.at/2016_10_13_Thomas_Resl_BIO_Mengenertr%C3%A4ge_FOODSECURITY_Fachtagung_final.pdf**

Schaufler G, Kitzler B, Schindlbacher A, Skiba U, Sutton MA, Zechmeister-Boltenstern S (2010). Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. European Journal of Soil Science 61, 683-696.

Schindlbacher A, Zechmeister-Boltenstern S, Butterbach-Bahl K (2004). Effects of soil moisture and temperature on NO, NO_2 and N_2O emissions from European forest soils. Journal of Geophysical Research 109.

Schmidt U, Thöni H, Kaupenjohann M (2000). Using a boundary line approach to analyze N_2O flux data from agricultural soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems 57: 119-129.

Shcherbak I, Millar N, Robertson GP (2014). Global meta-analysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N_2O) emissions to fertilizer nitrogen. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111, 9199-9204.

Schroeck AM, Gaube V, Haas E, Winiwater W (2019). Estimating nitrogen flows of agricultural soils at a landscape level – A modelling study of the Upper Enns Valley, a long-term socio-ecological research region in Austria. Science of Total Environment, 665, 275 – 289.

Seufert V, Ramankutty N, Foley JA (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. Nature, 485, 229 – 232.

Skinner C, Gattinger A, Muller A, Mäder P, Fließbach A, Stolze M, Ruser R, Niggli U (2014). Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management – A flobal meta-analysis. Science of Total environment, 468-469, 553 – 563.

Statistics Austria (2009). Harvest Survey. Standard documentation: Meta information (definitions, explanations, methods, quality) on the Harvest Survey. valid as of/for the period under review/survey date: 2003. Status: March 2009.

Statistics Austria 2014. Agrarstrukturerhebung (2013). Schnellbericht 1.17. Wien#

Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J. & Midgley PM (2013). Climate change IPCC 2013: The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), Cambridge Univ Press, New York, 25.

Umweltbundesamt (1996). Regionale Stoffbilanzen in der Landwirtschaft. Der Nährstoffhaushalt im Hinblick auf seine Umweltwirkung am Beispiel des Einzugsgebietes Strem., BMNT, Wien.

Umweltbundesamt (2019). Austria's National Inventory Report 2019, Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol, https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0677.pdf

Van Groenigen JW, Velthof GL, Oenema O, Van Groenigen KJ, Van Kessel C (2010). Towards an agronomic assessment of N2O emissions: a case study for arable crops. European Journal of Soil Science 61, 903-913.

Wagner K (1990). Neuabgrenzung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete in Österreich Teil I und Teil II; Bundesanstalt für Agrarwirtschaft, Schriftenreihe Nr. 61;

Zhang Y, Niu H (2016). The development of the DNDC plant growth sub-model and the application of DNDC in agriculture: A review. Agriculture, Ecosystems & Environment 230, 271-282.

4.2 Verordnungen und Leitlinien

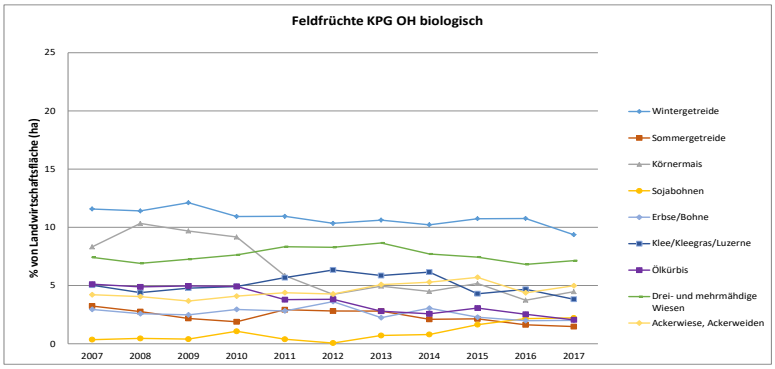
BMNT 2012: Aktionsprogramm Nitrat https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht_national/recht_gewaesserschutz/APNitrat2012.html

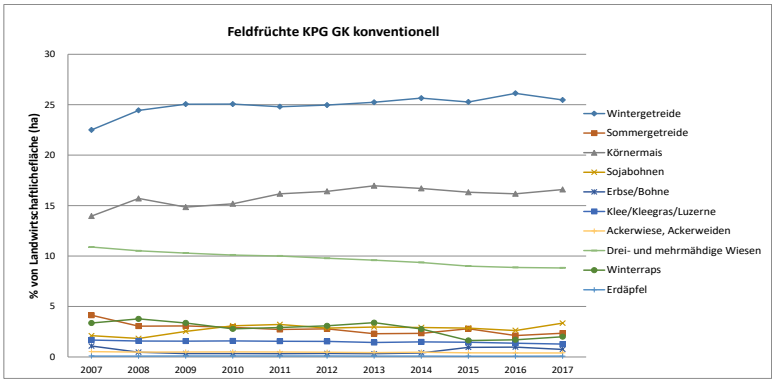
BMNT 2018: Sonderrichtlinen ÖPUL: https://www.bmnt.gv.at/land/laendl_entwicklung/foerderinfo/sonderrichtlinien_auswahlkriterien/srl_oepul.html

AMA 2018: Merkblätter https://www.ama.at/Formulare-Merkblaetter
https://www.ama.at/getattachment/c8360afb-5453-4009-874d-8ac34135e98e/MEB_OEPUL2015_UBB_5-0.pdf

https://www.ama.at/getattachment/264bf988-651e-49a0-bd76-fefe4266d22e/MEB_OEPUL2015_BIO_6-0.pdf

ANHANG





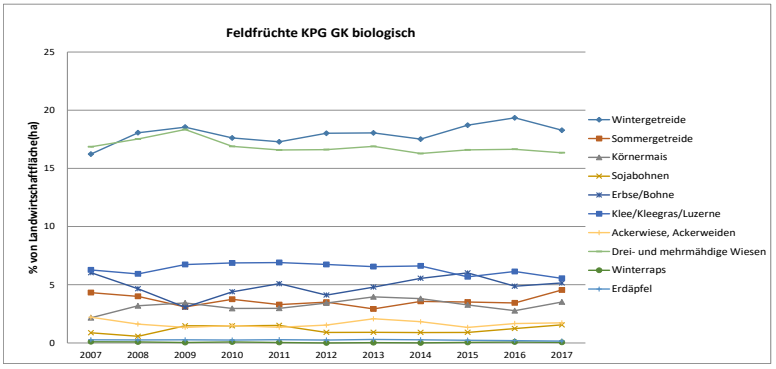


Abbildung 1-3/Annex: Anteil Feldfrüchte an der LW-Fläche in %

Tabelle 1/Annex: Mittlere, minimale und maximale jährliche N_2O Emissionen der verschiedenen Kulturen in dieser Studie

Region	Bewirtschaftung	Ackerkultur	Mittelwert	Minimum N_2O-N [kg ha-1 yr-1]		Maximum
GK	konv_MAX	Gerste	1,77	0,31	-	3,96
		Mais	2,19	0,27	-	4,77
		Soja	0,34	0,10	-	0,83
		Wintergerste	1,85	0,14	-	6,30
		Winterraps	0,41	0,17	-	0,88
		Winterweizen	1,01	0,14	-	3,74
	konv -15%	Gerste	1,31	0,25	-	3,17
		Mais	1,40	0,26	-	3,46
		Soja	0,30	0,10	-	0,69
		Wintergerste	1,28	0,12	-	4,72
		Winterraps	0,31	0,14	-	0,60
		Winterweizen	0,73	0,13	-	2,52
	konv -25%	Gerste	1,02	0,20	-	3,25
		Mais	1,04	0,26	-	2,81
		Soja	0,26	0,10	-	0,53
		Wintergerste	0,92	0,11	-	3,98
		Winterraps	0,27	0,13	-	0,53
		Winterweizen	0,56	0,12	-	1,98
	konv_UBB	Gerste	1,69	0,21	-	4,70
		Zuckerrübe	1,20	0,23	-	5,89
		Mais	1,80	0,23	-	5,86
		Begrünung	0,51	0,18	-	3,48
		Soja	0,63	0,15	-	3,62
		Wintergerste	2,00	0,19	-	6,16
		Winterraps	0,66	0,14	-	5,73
		Winterweizen	1,41	0,14	-	7,89
	biologisch	Gerste	0,37	0,16	-	1,50
		Mais	0,76	0,35	-	4,49
		Begrünung	0,33	0,14	-	2,28
		Erdäpfel	0,46	0,19	-	1,56
		Soja	0,58	0,15	-	1,82
		Wintergerste	0,68	0,20	-	5,20
		Winterweizen	0,75	0,18	-	3,00

Region	Bewirtschaftung	Ackerkultur	Mittelwert	Minimum		Maximum
			N_2O-N [kg ha-1 yr-1]			
MF	konv_MAX	Gerste	0,93	0,26	-	3,32
		Zuckerrübe	1,06	0,19	-	8,76
		Mais	1,24	0,22	-	5,45
		Gemüse	2,43	0,22	-	12,48
		Soja	0,21	0,07	-	0,53
		Wintergerste	1,08	0,22	-	8,09
		Winterweizen	1,02	0,26	-	5,23
	konv -15%	Gerste	0,74	0,20	-	1,95
		Zuckerrübe	0,85	0,18	-	5,84
		Mais	1,01	0,21	-	4,51
		Gemüse	1,58	0,19	-	6,17
		Soja	0,20	0,07	-	0,50
		Wintergerste	0,81	0,19	-	4,32
		Winterweizen	0,83	0,24	-	4,17
	konv -25%	Gerste	0,61	0,18	-	1,54
		Zuckerrübe	0,71	0,17	-	4,42
		Mais	0,85	0,21	-	3,42
		Gemüse	1,15	0,17	-	4,13
		Soja	0,19	0,07	-	0,48
		Wintergerste	0,66	0,18	-	2,88
		Winterweizen	0,72	0,23	-	3,42
	konv_UBB	Gerste	0,86	0,16	-	2,97
		Zuckerrübe	0,78	0,14	-	6,85
		Mais	1,12	0,16	-	9,79
		Gemüse	2,43	0,16	-	12,16
		Begrünung	0,55	0,09	-	4,25
		Soja	0,50	0,10	-	2,37
		Wintergerste	1,07	0,09	-	8,51
		Winterweizen	1,14	0,16	-	7,15
	biologisch	Gerste	0,30	0,17	-	1,57
		Mais	0,58	0,22	-	3,70
		Gemüse	0,79	0,23	-	4,60
		Begrünung	0,47	0,21	-	1,39
		Soja	0,35	0,08	-	2,10
		Wintergerste	0,78	0,17	-	7,73
		Winterweizen	0,83	0,17	-	4,58

Region	Bewirtschaftung	Ackerkultur	Mittelwert	Minimum		Maximum
			N_2O-N [kg ha-1 yr-1]			
OH	konv_MAX	Gerste	0,69	0,45	-	1,16
		Mais	1,00	0,35	-	8,17
		Kürbiskernö	1,07	0,39	-	5,46
		Soja	0,18	0,09	-	0,27
		Wintergerste	0,33	0,22	-	0,50
		Winterweizen	0,37	0,21		0,82
	konv -15%	Gerste	0,60	0,41	-	0,97
		Mais	0,83	0,28	-	6,85
		Kürbiskernö	0,90	0,33	-	4,97
		Soja	0,18	0,09	-	0,27
		Wintergerste	0,27	0,21	-	0,33
		Winterweizen	0,34	0,20		0,73
	konv -25%	Gerste	0,52	0,37	-	0,74
		Mais	0,69	0,26	-	5,11
		Kürbiskernö	0,77	0,30	-	4,26
		Soja	0,17	0,09	-	0,26
		Wintergerste	0,26	0,20	-	0,29
		Winterweizen	0,32	0,20		0,64